

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA  
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES ET DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA  
VIE  
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE



## *Thèse*

présentée pour l'obtention du diplôme de

**Docteur en sciences**

spécialité

**Informatique**

# **Animation multi-résolution de vêtements**

Présentée par : Sabrina BENAMEUR  
Directeur de thèse : Pr. NourEddine DJEDI

### **Jury :**

- Pr. CHERIF Foudil	Université de Biskra	Président
- Pr. DJEDI Nouredine	Université de Biskra	Rapporteur
- Pr. BATOUCHE Mohamed Chawki	Université de Constantine	Examineur
- Pr. BENMOHAMMED Mohamed	Université de Constantine	Examineur
- Pr. MOUSSAOUI Abdelouahab	Université de Sétif	Examineur

*Année Universitaire 2016/2017*

# Dédicaces

À

*Ma grand mère,*

*Mes parents,*

*Mon mari Lassaad "fouad",*

*Mes sœurs Mounira, Souhaila et Hanane,*

*Mes frères Abdessalam, Fouad, Hacem, Yazid, Mourad,*

*Adel, Fethi, Ilies, Okba, Lotfi et Faouzi ,*

*Mes filles Sarah et Tesnim,*

*Mon fils Younes,*

*Mes belles sœurs,*

*Mes nièces Narimène, Asma et Amani,*

*Mon neveu moataz biallah,*

*Mes neveux et nièces ,*

*Toute ma famille et toutes mes amies,*

*Je dédie ce modeste travail.*

# Remerciements

Je tiens premièrement à prosterner remerciant Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.

Je tiens ensuite à exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements au Pr. DJEDI NourEddine, pour m'avoir honoré par son encadrement, pour m'avoir bien suivi durant la réalisation de ce travail, pour ses conseils et ses remarques constructives qui m'ont réellement aidé à l'élaboration et l'amélioration de cette thèse, et surtout pour sa patience.

Mes vifs remerciements vont au président et membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail : Mr le Pr. CHERIF Foudil pour avoir accepté de présider le jury de soutenance ainsi que Messieurs le Pr. BATOUCHE Mohamed Chawki, le Pr. BENMOHAMMED Mohamed et le Pr. MOUSSAOUI Abdelouahab, pour avoir bien voulu juger ce travail en prenant la charge d'examineurs.

Un grand merci va également au Dr. Saouli Rachida pour ses relectures, et pour ses remarques et ses conseils qui m'ont vraiment permis d'améliorer ce travail.

Je remercie également Dr. Rezeg Khaled pour ses encouragements, ses conseils et sa disponibilité.

Mes sincères remerciements s'adressent à tous mes collègues du département d'informatique pour leurs encouragements en particulier : Dr. Khelil Leila, Mme Rahmani Salima, Mme Almi Moufida, Mme Touil Ketoum, Mme Hattab Dalila, Mme Hmidi Zohra, Mme Mouhammedi Amira, Mme Slatnia Sihem, Mme Mouaki Benani Nawel, Mme Fekraoui Farah, Mme Boukhlouf Djemaa, Mme Bouguetitiche Amina et Mme Moussaoui Manel.

Une pensée à l'égard de mes proches qui ont suivi de près ou de loin cette longue aventure : ma mère, mon père, mes sœurs, mes frères et mes enfants.

Enfin toute ma reconnaissance et gratitude s'adresse à mon mari Ayadi Lassaad pour ces idées, pour son aide et son soutien pratique et moral.

# Résumé

La modélisation et la simulation réaliste de vêtements par ordinateur prennent de plus en plus d'importance au sein de la communauté scientifique. Cette thèse se propose d'apporter des améliorations au niveau de la modélisation du tissu et au niveau de la vitesse de simulation, et ceci, afin de rendre les animations de tissus et de vêtements plus réalistes. A cet effet, nous nous plaçons dans le cadre de la représentation multi-résolution de tissu en utilisant un modèle basé sur la méthode des éléments finis du premier ordre.

La majorité des travaux antérieurs exploitant la multi-résolution ont utilisé des modèles discrets comme les systèmes masse-ressort en combinaison avec l'une des méthodes de subdivisions. L'inconvénient majeur de tels systèmes est la difficulté d'ajustement de leurs paramètres, ce qui ralentit la convergence du modèle surtout en utilisant différents niveaux de détails. Les modèles basés sur la méthode des éléments finis du premier ordre fonctionnent sur des maillages de triangles arbitraires, pas forcément réguliers. Cependant, ces modèles nécessitent des adaptations pour pouvoir gérer le contexte de grandes déformations propre à la simulation des tissus. L'utilisation des méthodes implicites permet de résoudre le problème de divergence du modèle, mais elles sont très coûteuses en temps de calcul. Tandis que, les méthodes explicites, qui sont assez simples à implémenter, ne convergent pas si le pas du temps est assez grand.

Dans ce travail, nous avons utilisé les méthodes d'intégrations explicites et implicites pour la résolution des équations du mouvement. Pour assurer la convergence du modèle avec les méthodes explicites, nous avons proposé une méthode de correction de positions des particules. Avec cette méthode, nous avons pu limiter le déplacement de chaque particule à chaque itération de telle sorte que chaque particule ne peut pas se déplacer plus qu'une certaine distance (seuil) que nous avons déterminée après plusieurs tests. Et pour offrir plus de stabilité au système, nous avons proposé une exploitation efficace de la méthode d'intégration Euler implicite, cette méthode nous a permis d'une part d'assurer la convergence du modèle et d'autre part d'éviter les calculs additionnels tels que la résolution d'un grand système linéaire ou l'utilisation du Jacobien.

Afin d'améliorer la vitesse de la simulation, nous avons profité de la représentation multi-résolution du tissu. De telle sorte que les parties détaillées sont représentées par un maillage raffiné, tandis que les régions suffisamment plates sont représentées par un maillage simplifié.

**Mots clés :** *Simulation de vêtements, Système de particules, Modèle physique, Éléments finis, Multi-résolution, Niveaux de détails, Correction de position, Méthode d'intégration.*

## ملخص

نمذجة ومحاكاة الملابس عن طريق الكمبيوتر أصبحت ذات أهمية متزايدة داخل المجتمع العلمي. تقترح هذه الأطروحة إلى إدخال تحسينات على نماذج النسيج و كذا في سرعة المحاكاة، ومن أجل جعل الرسوم المتحركة من الأقمشة والملابس أكثر واقعية. تحقيقا لهذه الغاية، فإننا نضع أنفسنا في سياق تمثيل متعدد-السلم للنسيج باستخدام نموذج يركز على طريقة العناصر المحددة من الدرجة الأولى.

معظم الأعمال السابقة المستغلة للطريقة متعددة-السلم استعملت نماذج منفصلة تستخدم كنظام كتلة-نايظ في مزيج مع واحد من التقسيمات الموجودة. العيب الرئيسي لهذه الأنظمة هو صعوبة ضبط المعلومات، والتي تبطن من تقارب النموذج وخاصة باستخدام مستويات مختلفة من التفاصيل. النماذج المرتكزة على العناصر المحدودة ذات الأساس الأول تعمل على شبكات المثلثات المختلفة، وليس بالضرورة العادية. ومع ذلك، فإن هذه النماذج تتطلب التكيف مع إدارة سياق التشوهات الكبيرة و الخاصة بمحاكاة الأقمشة. استخدام طرق التكامل الضمنية يحل المشكلة لكنها مكلفة جدا حسابيا. بينما الطرق الصريحة التي هي بسيطة نسبيا من ناحية التنفيذ، لا تتلاقى إذا كان وقت الخطوة كبير جدا.

في هذا العمل، استخدمنا طرق التكامل الصريحة والضمنية من أجل حل معادلات الحركة. لضمان تقارب النموذج مع طرق التكامل الصريحة اقترحنا طريقة لتصحيح وضعية الجسيمات. مع هذا الأسلوب، تمكنا من الحد من حركة كل جسيم في كل خطوة من المحاكاة، بحيث أنه لا يمكن أن يتحرك أكثر من مسافة معينة (عتبة) التي توصلنا إليها بعد عدة اختبارات. ولتوفير استقرار أكبر للنظام، اقترحنا طريقة فعالة لاستخدام التكامل الضمني Euler، الطريقة المقترحة مكنتنا أولا من ضمان التقارب في النموذج وأيضا تجنب حسابات إضافية مثل حل نظام خطي كبير أو استخدام مصفوفة Jacobien

ولتحسين سرعة المحاكاة استغلينا تمثيلا متعدد-السلم للنسيج. بحيث تمثل المناطق المفصلة بشبكة دقيقة، في حين يتم تمثيل مناطق المسطحة بشبكة بسيطة.

**الكلمات المفتاحية:** محاكاة الملابس، نظام الجسيمات، نموذج فيزيائي، العناصر المحدودة، متعدد-السلم، مستويات من التفاصيل، تصحيح الوضعية، طرق التكامل.

# Abstract

Realistic garment Modeling and simulation by computer are becoming increasingly important within the scientific community. This thesis proposes to make improvements in the cloth modeling and at the simulation speed, in order to make cloth and garment animations more realistic. So, the general context of our work is multi-resolution representation of cloth using a model based on the first order finite element method.

Previous works on multi-resolution cloth simulation used discrete cloth models like mass-spring in combination with one of subdivision schemes. The major drawback of such models is the difficulty of adjusting their parameters, which slows down the convergence of the model, especially when using different levels of details. Models based on first order finite element method can handle arbitrary triangle meshes, not necessarily regular ones. However, some adaptations are necessary to be able to correctly manage the context of large deformations due to the cloth simulation. The use of implicit methods solves the problem of divergence of the model, but they are very expensive computationally. While explicit methods that are fairly simple to implement, does not converge if the time-step is large enough.

In this work, we have used the explicit and implicit integration methods for solving the equations of motion. To ensure the convergence of the model with the explicit methods we proposed a method for correcting the positions of particles. With this method, we can limit the displacement of each particle, at each iteration, so that it cannot move more than a certain distance (threshold) that we have determined after several tests. In order to provide more stability to the system, we proposed an efficient exploitation of the implicit Euler integration method, allowing us on the one hand to ensure the convergence of the model and on the other hand to avoid additional calculations such as the resolution of a large linear system or the use of Jacobian.

To improve the speed of the simulation, we took advantage of the multi-resolution representation of the cloth. So detailed parts are represented by a refined mesh, while sufficiently flat regions are represented by a simplified mesh.

**Key words :** Cloth simulation, Particle Systems, Physical based model, Finite element, Multiresolution, Level of Details, Position correction, Integration method.

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>I</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>VI</b>
<b>Liste des tables</b>	<b>X</b>
<b>1 Introduction générale</b>	<b>1</b>
1.1 Objectif . . . . .	1
1.2 Contributions . . . . .	2
1.3 Organisation du manuscrit . . . . .	3
<b>2 La Simulation de vêtements : État de l'art et perspectives de recherche</b>	<b>4</b>
2.1 Introduction . . . . .	4
2.2 Tissu réel . . . . .	5
2.3 Définitions . . . . .	6
2.4 Propriétés mécaniques du tissu . . . . .	6
2.5 La Simulation de vêtements. . . . .	7
2.5.1 La Modélisation de tissu et de vêtements . . . . .	7
2.5.1.1 Approches géométriques . . . . .	8
2.5.1.2 Approches physiques . . . . .	9
2.5.1.2.1 Modèles continus . . . . .	9
2.5.1.2.2 Modèles discrets . . . . .	10
2.5.1.3 Approches hybrides . . . . .	12
2.5.1.4 Avantages et inconvénients des approches dédiées à la simulation de vêtements. . . . .	13
2.5.1.5 Problématique . . . . .	14

2.5.1.5.1	Augmentation de la fidélité de la simulation	14
2.5.1.5.2	Amélioration de la vitesse des algorithmes	14
2.5.1.6	Bilan	14
2.5.2	La gestion de collisions	15
2.5.2.1	Travaux antérieurs	15
2.5.2.2	Détection de collisions	17
2.5.2.2.1	Détection de collision avec les méthodes de subdivision d'objet	17
2.5.2.2.2	Détection de collision à base de voxels	17
2.5.2.2.3	Détection de collision à base d'images	18
2.5.2.2.4	Détection de collision avec les surfaces impli- cites	18
2.5.2.3	Réponses aux collisions	19
2.5.2.3.1	Méthodes des pénalités (Penalty forces)	19
2.5.2.3.2	Méthodes des contraintes dynamiques	20
2.5.2.4	Problématique	21
2.5.2.4.1	Détection de collisions rapide	21
2.5.2.4.2	Détection de collisions précise	22
2.5.2.4.3	Génération robuste de réponses aux collisions	22
2.5.2.5	Bilan	22
2.6	Conclusion	23
<b>3</b>	<b>Exploitation de la multi-résolution dans la simulation de tissus et de vêtements</b>	<b>24</b>
3.1	Introduction	25
3.2	Notions fondamentales	25
3.2.1	Maillages polygonaux	25
3.2.2	Régularité	26
3.2.3	Critère de Delaunay	26
3.2.4	La multi-résolution	27
3.2.4.1	La simplification polygonale	28
3.2.4.2	Subdivision Adaptative (Adaptative Subdivision)	28
3.2.5	Les modèles multi-résolution	29

3.2.5.1	Multi-résolution discrète (Niveaux de détails statiques)	29
3.2.5.2	Mutirésolution continue (Niveaux de détails dynamiques)	30
3.3	Travaux exploitant la multi-résolution . . . . .	30
3.3.1	Adaptive refinement for Mass/spring simulation [38] . . . . .	31
3.3.1.1	Les problèmes de systèmes masse-ressort statiques . . . . .	31
3.3.1.2	Principe de la méthode . . . . .	31
3.3.1.3	La méthode de subdivision . . . . .	32
3.3.2	Intégration de la multi-résolution dans un système de défor- mation masse-ressort [12] . . . . .	33
3.3.2.1	Critères de subdivision . . . . .	33
3.3.2.2	Méthode de subdivision . . . . .	34
3.3.3	Implémentation d'une méthode d'intégration de la multi-résolution dans un système masse-ressort : application à l'animation de tissu [3] . . . . .	34
3.3.3.1	Niveaux hiérarchiques . . . . .	34
3.3.3.2	Annulation d'une subdivision . . . . .	35
3.3.4	Cloth Animation with Adaptively Refined Meshes [51] . . . . .	35
3.3.4.1	Maillage adaptatif . . . . .	36
3.3.4.2	Règle de raffinement $\sqrt{3}$ . . . . .	36
3.3.4.3	Critère de raffinement et de simplification . . . . .	37
3.3.5	Adaptive meshing for cloth animation [82] . . . . .	37
3.3.5.1	Maillage adaptatif . . . . .	37
3.3.5.2	Critère de raffinement . . . . .	38
3.3.6	Fast Virtual Cloth Energy Minimization [48] . . . . .	38
3.3.6.1	Minimisation d'énergie . . . . .	38
3.3.6.2	La représentation multi-résolution . . . . .	39
3.3.7	Towards Efficiency in Cloth Simulation [6] . . . . .	39
3.3.7.1	Subdivision adaptative 4-8 . . . . .	39
3.3.7.2	Raffinement et simplification . . . . .	40
3.3.8	Efficient cloth simulation using an adaptive finite element me- thod [4] . . . . .	40
3.3.8.1	Critère de raffinement . . . . .	40

3.3.9	Fast and stable cloth simulation based on multi-resolution shape matching [5] . . . . .	41
3.3.10	Multiresolution cloth based on animation instances [74] . . . . .	41
3.4	Récapitulatif . . . . .	42
3.5	Conclusion . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Simulation de vêtements par modèle physique</b>	<b>44</b>
4.1	Introduction . . . . .	44
4.2	Généralité sur la simulation des vêtements . . . . .	46
4.2.1	La dynamique . . . . .	46
4.2.2	Propriétés physiques des tissus . . . . .	47
4.2.3	La simulation mécanique et son application aux tissus . . . . .	47
4.2.4	Le modèle . . . . .	48
4.2.4.1	Méthode des éléments finis . . . . .	48
4.2.4.2	Les systèmes de particules . . . . .	48
4.2.4.3	Les systèmes masse-ressort . . . . .	49
4.2.4.4	Un système de particule précis . . . . .	49
4.2.4.5	Méthode d'intégration . . . . .	50
4.3	La simulation de tissu et de vêtement par un modèle physique . . . . .	52
4.3.1	Choix de la méthode d'intégration . . . . .	55
4.4	Correction des positions . . . . .	56
4.5	La gestion de collision . . . . .	57
4.6	Résultats expérimentaux . . . . .	58
4.6.1	Etude comparative . . . . .	63
4.6.2	Discussion des résultats . . . . .	64
4.7	Conclusion . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Simulation multi-résolution de tissus et de vêtements</b>	<b>66</b>
5.1	Introduction . . . . .	66
5.2	Intégration de la multi-résolution dans la simulation de tissu et de vêtements . . . . .	67
5.2.1	Méthode de subdivision (Schéma polyédral) . . . . .	68
5.2.2	Critère de subdivision . . . . .	70

5.2.3	Annulation d'une subdivision . . . . .	70
5.3	Évaluation des résultats expérimentaux . . . . .	72
5.3.1	Méthode d'intégration implicite . . . . .	72
5.3.2	Méthode de correction de positions de particule vs pas du temps	73
5.3.3	Forme et position de tissu . . . . .	75
5.3.4	Seuil utilisé dans la méthode de correction de position . . . . .	75
5.3.5	Critère de subdivision . . . . .	78
5.3.6	Nombre de niveaux de détails et forme de tissu VS nombre de triangles du maillage . . . . .	79
5.3.7	Résolution du maillage VS temps d'exécution . . . . .	80
5.3.8	Etude comparative . . . . .	82
5.3.9	Discussion des résultats . . . . .	83
5.4	Conclusion . . . . .	83
<b>6</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>84</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>87</b>

# Liste des figures

2.1	Quelques photographies de tissus tissés [45] . . . . .	5
2.2	Chronologie de quelques travaux de recherche pour la simulation de tissus et de vêtements . . . . .	8
2.3	Discrétisation du textile en un maillage polygonal. [95] . . . . .	10
2.4	Système masses-ressorts de Provot [70] . . . . .	11
2.5	Approximation de la forme d'humain virtuel par des quadriques [66]	16
2.6	Les deux types de collision [71] . . . . .	17
2.7	Subdivision de l'espace avec des octrees (cas 2D et 3D) [20] . . . . .	18
2.8	Illustration de la méthode des pénalités [20] . . . . .	19
2.9	Correction de la vitesse [20] . . . . .	20
3.1	Régularité du maillage [25] . . . . .	26
3.2	Maillage irrégulier et maillage semi-régulier (en noir les sommets irréguliers, en gris, les sommets réguliers). [25] . . . . .	26
3.3	Triangle Delaunay (à gauche), triangle non-Delaunay (à droite) [25] .	27
3.4	Création d'un maillage à partir de la triangulation de Delaunay : (a) Nuage de points, (b) diagramme de Voronoï, (c) triangulation de De- launay et (d) maillage triangulaire. [25] . . . . .	27
3.5	Gestion de la complexité d'un modèle en faisant varier le niveau de détail utilisé pour le rendu de petits objets ou des objets éloignés.[53]	28
3.6	Exemple de subdivision adaptative [43] . . . . .	28
3.7	Déroulement d'une subdivision [12] . . . . .	31
3.8	Schéma hiérarchique de deux niveaux de subdivision [12] . . . . .	32
3.9	Changement d'état d'un point interpolé après la subdivision carrée [12] . . . . .	33
3.10	Maillage triangulaire [12] . . . . .	33
3.11	Deux triangles non coplanaires [12] . . . . .	33

3.12 Un exemple de maillage triangulé quelconque (à gauche), après deux subdivisions (à droite) [12] . . . . .	34
3.13 La hiérarchie d'un triangle subdivisé selon le schéma polyédral [3] .	35
3.14 Annulation de la subdivision dans une zone plate [3] . . . . .	35
3.15 La courbure (comme représentée par différentes couleurs à (b)) change notamment à travers un vêtement [51] . . . . .	36
3.16 Construction d'une résolution plus fine avec la règle de raffinement $\sqrt{3}$ [51] . . . . .	37
3.17 Raffinement de maillage dans 3 étapes . . . . .	38
3.18 Une pièce de tissu sur une balle . . . . .	38
3.19 Représentation multi-résolution d'une chemise . . . . .	39
3.20 Subdivision adaptative 4-8 . . . . .	39
4.1 Un triangle à l'état initial défini par les coordonnées paramétriques 2D de ses sommets (à gauche), et après sa déformation définie par les coordonnées 3D de ses sommets (à droite) [88] . . . . .	53
4.2 Animation de pièces de tissus (Méthode d'Euler, 2000 itérations) . .	59
4.3 Animation de pièces de tissus (Méthode d'Euler modifiée, 2000 itérations) . . . . .	59
4.4 Animation de pièces de tissus (Méthode d'Euler implicite, 2000 itérations) . . . . .	59
4.5 Animation d'une pièce de tissu de 990 triangles (Méthode d'Euler) .	60
4.6 Animation d'une pièce de tissu de 990 triangles (Méthode d'Euler modifiée) . . . . .	60
4.7 Animation d'une pièce de tissu de 990 triangles (Méthode d'Euler implicite) . . . . .	60
4.8 Animation d'une pièce de tissu en coton de 990 triangles avec 2000 itérations et un pas de temps 0.001 . . . . .	61
4.9 Animation d'une pièce de tissu en lin de 990 triangles avec 2000 itérations et un pas de temps 0.001 . . . . .	61
4.10 Animation d'une pièce de tissu en soie de 990 triangles avec 2000 itérations et un pas de temps 0.001 . . . . .	61

4.11 Animation d'un vêtement en Coton (a) Sans correction des positions (b) avec correction des positions . . . . .	62
4.12 Animation d'un vêtement en Lin (a) Sans correction des positions (b) avec correction des positions . . . . .	62
4.13 Animation d'un vêtement en Soie (a) Sans correction des positions (b) avec correction des positions . . . . .	63
4.14 Un calcul précis du Jacobien est nécessaire pour avoir une simulation stable [88] . . . . .	63
4.15 Tissu suspendu en 3 points (la simulation reste stable) . . . . .	64
5.1 Schéma de subdivision polyhédral . . . . .	69
5.2 Augmentation de l'angle critique lorsque l'aire des triangles diminue	70
5.3 Annulation de la subdivision du triangle T . . . . .	71
5.4 Tissu qui tombe sur une sphère sans correction de positions ( $h= 0.00005$ )	73
5.5 Tissu qui tombe sur une sphère sans correction de positions ( $h= 0.0001$ )	73
5.6 Tissu qui tombe sur une sphère avec une itération de correction de positions ( $h= 0.0001$ ) . . . . .	74
5.7 Tissu qui tombe sur une sphère avec correction de positions ( $h= 0.0005$ )	74
5.8 Tissu qui tombe sur une sphère avec correction de positions ( $h= 0.001$ ) (méthode d'Euler implicite) . . . . .	74
5.9 Tissu qui tombe sur une sphère avec correction de positions ( $h= 0.001$ ) (méthode d'Euler modifiée) . . . . .	75
5.10 Tissu suspendu en 2 points avec correction de positions ( $h= 0.0005$ ) .	75
5.11 Tissu qui tombe sur une sphère avec correction de positions ( $h= 0.0005$ )	76
5.12 Tissu qui tombe sur une sphère avec correction de positions ( $h= 0.0005$ )	76
5.13 Variation du nombre de correction de positions en fonction de la va- leur de seuil . . . . .	78
5.14 La variation du nombre de triangles selon l'angle de subdivision et le nombre de niveaux de détails choisi . . . . .	79
5.15 Variation du nombre de triangles selon le nombre d'itérations . . . . .	80
5.16 Étapes d'animation d'un tissu qui tombe sur une sphère et d'un vête- ment (les triangles subdivisés sont en rouge et les triangles subdivi- sés et annulés sont en vert) . . . . .	80

5.17 Variation du temps d'exécution en fonction de la résolution du maillage (avec le même nombre d'itérations) . . . . .	81
5.18 Comparaison entre les résultats de J. Bender [4] et nos résultats . .	82

# Liste des tables

2.1	Avantages et inconvénients des approches dédiées à la simulation de vêtements . . . . .	13
2.2	Avantages et inconvénients des méthodes de détection de collision . .	19
2.3	Avantages et inconvénients des méthodes de réponses aux collisions	21
3.1	Quelques travaux exploitant la multi-résolution . . . . .	42
5.1	Variation du nombre de correction de positions durant la simulation en fonction de la valeur de seuil . . . . .	77
5.2	Variation des nombres de subdivisions effectuées et annulées et du nombre de triangles selon l'angle de subdivision (tests d'animation d'un Vêtement / Cylindre avec 1000 itérations) . . . . .	78

# Introduction générale

**D**ans le domaine de l'animation, on cherche à générer principalement des variations temporelles où le temps est décomposé en durées élémentaires qui, en se succédant, simulent l'évolution continue de la réalité. Le mouvement naît, comme au cinéma, de la succession des positions propres à chaque durée élémentaire [31]. Dans ce travail, on s'intéresse particulièrement au problème de l'animation de vêtements.

Au cours des dernières années, beaucoup de travaux ont été réalisés dans le but de rendre les personnages virtuels plus réalistes. En effet, ces personnages sont omniprésents autour de nous : films, simulations virtuelles, jeux, etc. Évidemment, la génération de vêtements réalistes sur ces personnages est primordiale pour obtenir un niveau de réalisme acceptable pour ces derniers. L'intérêt à ce sujet n'est pas récent ; depuis le milieu des années 1980, la simulation de tissus est un sujet très à la mode en synthèse d'animation. Malgré tous les travaux réalisés dans ce domaine, l'animation de tissus demeure très complexe. D'une technique de simulation à l'autre, la qualité des résultats obtenus, le temps de calcul et la facilité d'utilisation varient énormément. De surcroît, étant donné que les tissus et les vêtements se retrouvent pratiquement partout dans notre vie quotidienne, l'œil peut difficilement être trompé lorsqu'il est question de réalisme [45].

Dans ce cadre, il s'agit de considérer deux critères essentiels à savoir le réalisme (fidélité) de la simulation du mouvement de tissu et la vitesse de simulation. Il est important d'avoir un temps de calcul raisonnable. Même avec toutes les avancées, il demeure relativement coûteux de simuler des tissus réalistes. Effectivement, la résolution des maillages polygonaux des tissus doit être assez fine pour capturer les détails de tissu à savoir les plis qui se forment lorsque des forces agissent sur ces derniers, ce qui augmente grandement le temps de calcul nécessaire à la simulation. De plus, les paramètres nécessaires à la simulation de différents types de tissus sont très difficiles à obtenir et sont dépendants de la résolution des maillages.

## 1.1 Objectif

La génération de vêtements réalistes sur des personnages virtuels (p. ex. films, simulations, jeux, etc.) contribue grandement au niveau de réalisme de ces der-

niers. L'utilisation des modèles physiques permet de générer des simulations visuellement acceptables, mais elle est très coûteuse en temps de calcul et permet difficilement à l'utilisateur de contrôler précisément l'animation finale. Le temps de calcul dépend également de la résolution du maillage. Une résolution trop raffinée risque d'accroître le temps de calcul tandis qu'un maillage simplifié conduit à une perte de détails.

L'objectif de ce travail est d'étudier et de proposer des solutions pour la simulation de tissus et de vêtements temps réel qui reste encore un sujet de recherche à explorer. Plus précisément, il faut développer un modèle pour résoudre les différents problèmes que pose l'animation temps réel de vêtements. Il faut donc choisir un modèle basé sur la physique pour reproduire la forme et le mouvement du vêtement de manière adéquate. Et pour améliorer la vitesse de simulation, il en résulte un besoin de tirer profit des techniques de niveaux de détails, et ce, en utilisant un maillage adaptatif, ce qui permet de faire un compromis entre l'apparence visuelle et le temps de calcul.

## 1.2 Contributions

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons essentiellement à la simulation multi-résolution de tissus/vêtements par modèles physiques. En étudiant les différents travaux dans ce domaine, nous avons remarqué que les systèmes masses-ressorts sont les plus utilisés du fait de leurs simplicités et leurs facilités d'implémentation. Mais il est très difficile d'ajuster les paramètres de ces systèmes ce qui ralentit la convergence du modèle surtout dans le cas des maillages adaptatifs.

Afin d'obtenir un bon compromis entre précision et vitesse de calcul les éléments finis du premier ordre, ont été récemment réintroduits. Dont ils ont été exprimés comme des systèmes simples de particules. Cependant, différentes adaptations sont utilisées pour pouvoir gérer correctement le contexte de grandes déformations propre à la simulation des tissus. Parmi les solutions proposées pour assurer la convergence de ces modèles est l'utilisation des méthodes d'intégrations implicites qui sont coûteuses en temps de calcul. Ceci nous a amenés à penser aux méthodes d'intégrations explicites qui sont plus simples à implémenter, mais elles n'assurent pas la convergence, à moins qu'on utilise un pas de temps assez petit.

Pour résoudre le problème de divergence du modèle, nous avons proposé une méthode de correction de positions des particules. Avec cette méthode, nous avons pu limiter le déplacement de chaque particule à chaque itération de telle sorte que chaque particule ne peut pas se déplacer plus d'une certaine distance (seuil) que nous avons déterminée après plusieurs tests. Les animations obtenues avec les méthodes d'intégration explicites n'étaient pas convaincantes parce que le mouvement était un peu rigide surtout avec l'intégration de la multi-résolution. Du fait qu'on était obligé d'appliquer la correction de positions de particules plusieurs fois pour éviter la déchirure du tissu.

Puisque les méthodes implicites offrent plus de stabilité au système, nous avons implémenté la méthode d'Euler implicite. A ce niveau, nous voulons éviter les calculs additionnels tels que la résolution d'un grand système linéaire ou l'utilisation du Jacobien. Notre contribution était donc dans l'exploitation de la méthode d'intégration implicite, nous avons proposé une méthode qui consiste à calculer d'abord les forces de toutes les particules, ensuite faire le calcul des vitesses et positions des particules. En respectant cet ordre de calcul nous pouvons calculer la vitesse de chaque particule en fonction de sa force au temps  $t + h$  et non pas au temps  $t$ , ce qui est le principe des méthodes implicites.

## 1.3 Organisation du manuscrit

Ce travail de recherche s'intéresse à la simulation multi-résolution de tissu et de vêtement par modèle physique. Ce document est composé de cette introduction et de cinq chapitres.

Nous nous sommes intéressés à la simulation du tissu et de vêtement, nous avons donc vu qu'il est primordial de comprendre leur particularité. Le deuxième chapitre est ainsi consacré à la présentation de **la simulation de vêtements**. Dont nous commençons par des définitions concernant le tissu et ses propriétés mécaniques, par la suite un état de l'art sur la simulation de tissus et de vêtements sera présenté avec une description des problèmes de recherche qui nécessitent des investigations de recherche soutenues.

Le troisième chapitre décrit les notions fondamentales liées à **la représentation multi-résolution**. Et pour expliquer le principe d'intégration de cette méthode d'optimisation dans la simulation de tissus et de vêtements, nous avons présenté brièvement quelques travaux ayant exploité la multi-résolution.

Le quatrième chapitre concerne la description de notre modèle de simulation de tissus et de vêtements. Afin de comprendre notre modèle de simulation, nous présentons au début du chapitre des généralités sur la simulation de vêtements par **modèle physique**. Nous détaillerons ensuite notre modèle tout en expliquant les méthodes **d'intégration implicite** et de **correction de positions** que nous avons proposées pour assurer la convergence de la simulation ainsi que la méthode de gestion de collision que nous avons choisie. Une discussion sur les résultats obtenus est exposée dans une dernière partie du chapitre.

Puisque notre travail rentre dans le cadre d'optimisation de la simulation de vêtement avec l'exploitation de la multi-résolution, nous consacrons le cinquième chapitre à l'explication du principe de l'intégration de cette méthode dans notre modèle de simulation. Une grande section du chapitre est réservée à l'illustration des résultats obtenus avec une évaluation détaillée de ces derniers.

Enfin, le chapitre six conclut cette thèse par une analyse du travail effectué et par une proposition de travaux futurs.

# La Simulation de vêtements : État de l'art et perspectives de recherche

## Sommaire

---

2.1	Introduction . . . . .	4
2.2	Tissu réel . . . . .	5
2.3	Définitions . . . . .	6
2.4	Propriétés mécaniques du tissu . . . . .	6
2.5	La Simulation de vêtements. . . . .	7
2.5.1	La Modélisation de tissu et de vêtements . . . . .	7
2.5.2	La gestion de collisions . . . . .	15
2.6	Conclusion . . . . .	23

---

## 2.1 Introduction

**L**A simulation temps réel d'humains virtuels occupe une place très importante dans la recherche dédiée à l'informatique graphique. Depuis quelques années, de multiples applications émergentes : réalité virtuelle, réalité augmentée, jeux vidéo, films d'animation...etc. Cette simulation inclut plusieurs technologies comme l'animation faciale, la déformation de la peau, la modélisation du comportement et la simulation des vêtements...

La simulation des vêtements possède une grande importance dans l'animation par ordinateur. Si la simulation des vêtements peut prétendre la génération de mouvements réalistes en temps réel, elle pourrait être très utile dans différents domaines de la vie quotidienne. Le développement du potentiel des ordinateurs (processeurs, architectures, processeurs graphiques) a permis d'envisager des applications temps réel de vêtements.

Au début de ce chapitre, nous présentons quelques définitions concernant le tissu et ses propriétés mécaniques, par la suite nous détaillons la simulation de

vêtements tout en réservant une première partie aux différentes approches utilisées dans ce domaine et une deuxième partie aux méthodes de gestion de collisions. Nous avons essayé dans ces deux parties d'étudier et de citer les différents travaux de recherches, cette étude bibliographique nous a permis de faire un diagnostic sur les problèmes de recherche qui nécessitent des investigations de recherche.

## 2.2 Tissu réel

Pour parvenir à simuler de manière réaliste les tissus synthétiques, il est important d'en connaître un peu sur les tissus réels. On distingue plusieurs types de tissus en fonction de leur procédé de fabrication, dont les tissus tissés (entrelacement de fils orthogonaux) et les tricotés (combinaison de mailles) [45].

Un tissu « surface souple » est le résultat physique de l'entrelacement des fils textiles chaîne « sens longitudinal » et trame « sens transversal ». Le mode d'entrelacement des deux séries de fils, en tenant compte de leur nature, leurs propriétés mécaniques, physiques et chimiques, joue un rôle sur l'effet esthétique et influe largement sur la qualité du tissu [76].

Il existe une très grande variété de tissus tissés, comme le montrent les exemples de la figure 2.1, ces étoffes tissées sont constituées par l'entrecroisement de fils de chaîne, et de fils de trame. L'apparence et le comportement mécanique (réaction du tissu en réponse à l'application de forces ou de contraintes) du tissu sont intrinsèquement reliés à la structure interne de ce dernier : la nature des fibres (coton, laine, soie, etc.), la structure des fils (diamètre, fil simple ou torsionné, couleur, etc.), le mode d'entrecroisement des fils de trame et de chaîne (« armure »), et le nombre de fils au centimètre en trame et en chaîne (« compte »). Tout dépendant des choix faits lors de la confection, les tissus peuvent être souples ou rigides, mats ou brillants, lisses ou rugueux, texturés ou plats, etc. [45].

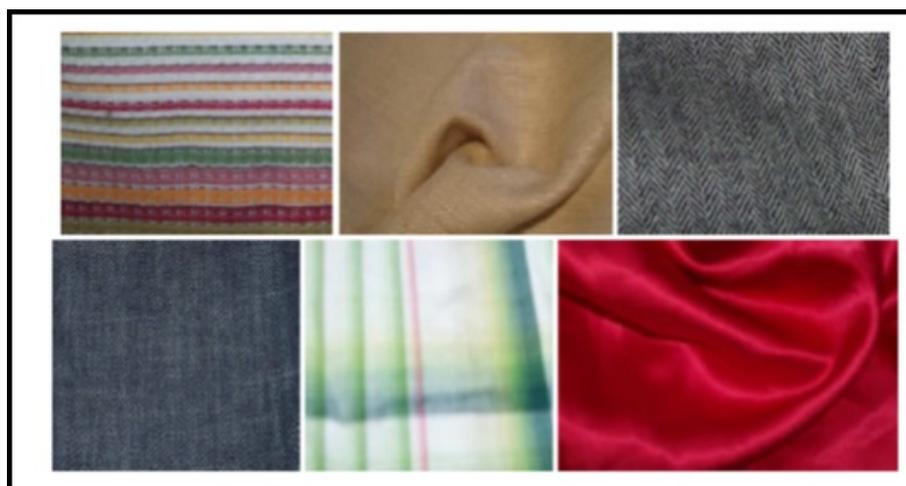


FIGURE 2.1 – Quelques photographies de tissus tissés [45]

## 2.3 Définitions

- L'entrelacement régulier de fils textiles chaîne et trame forme une surface souple dite **tissu**. Celle-ci est discontinue, anisotrope, d'élasticité non linéaire et sujette à l'hystérésis [76].
- **La chaîne (warp)** est l'ensemble de fils placés les uns à côté des autres et ayant la longueur de la pièce de tissu.
- **La trame** est l'ensemble de fils perpendiculaires aux fils de chaîne et qui s'entrecroisent avec eux ; ils sont appelés duites.
- **L'armure** est le mode d'entrecroisement de la chaîne (sens longitudinal) et de la trame (sens transversal) d'un tissu.
- **Le fil** est l'élément constituant la chaîne.
- **La duite** est le fil constituant la trame.

## 2.4 Propriétés mécaniques du tissu

Dans la littérature, les propriétés mécaniques des surfaces déformables dont le tissu fait partie sont regroupées en quatre familles :

- **Élasticité** : qui caractérise les forces internes résultant d'une déformation géométrique donnée.
- **Viscosité** : qui inclut les forces internes résultant d'une vitesse de déformation donnée.
- **Plasticité** : qui décrit comment les propriétés évoluent en fonction de la déformation.
- **Résilience** : qui définit les limites auxquelles la structure se brise.

Les propriétés d'élasticité telle que la traction, le cisaillement et la flexion sont les plus importants, puisqu'elles sont responsables des effets mécaniques des tissus

Pour avoir une simulation dynamique précise des tissus et des vêtements, les paramètres doivent être extraits à partir de mesures d'un tissu réel. Cette tâche n'est pas simple à réaliser parce que le tissu est un matériau très complexe. Pour cela, des précautions particulières doivent être prises lorsqu'on prend des mesures et on les applique dans une simulation virtuelle [54].

Étant donné que les tissus sont omniprésents, tant autour de nous que dans les milieux virtuels (vêtements des personnages virtuels, drapeaux, rideaux, etc.), la capacité de les simuler de façon réaliste affecte énormément la qualité des animations produites. [45]

## **2.5 La Simulation de vêtements.**

Créer un modèle pour la simulation de vêtements temps réel nécessite une action sur les aspects principaux que sont la modélisation des vêtements et leurs comportements et la gestion des collisions. Ce paragraphe est divisé donc en deux parties : la première partie est réservée à la modélisation de tissu et de vêtements ainsi que la plupart des approches utilisées dans ce domaine tout en signalant les problèmes de recherche en cours et nécessitant davantage d'investigations. La deuxième partie traite les différents travaux de recherches liés aux problèmes de gestion de collisions dans le domaine d'animation de vêtements et ceci dans le but de faire un diagnostic des aspects déjà traités et ceux nécessitant davantage d'efforts de recherche.

### **2.5.1 La Modélisation de tissu et de vêtements**

Les premières recherches en matière de modélisation de tissu ont été entreprises dès l'année 1930 par la communauté de l'ingénierie du textile. Au début des années 80, le tissu était modélisé comme une texture plaquée sur des surfaces rigides. Depuis, les recherches ont beaucoup évolué avec l'étude des techniques de modélisation et d'animation de tissu. L'un des principaux intérêts de la communauté du textile est l'exactitude de la modélisation et la prédiction du comportement non linéaire du tissu.

En infographie, l'efficacité, la stabilité et le réalisme visuel sont plus importants que la précision. Afin de rapprocher ces caractéristiques, de nombreuses techniques ont été proposées dans la littérature de l'informatique graphique. Ces techniques sont classées en 3 approches : géométrique, physique et hybride. Dans ce paragraphe, nous allons tenter de décrire le principe de ces approches tout en citant quelques travaux pour chacune d'elles. La chronologie de la recherche dans la simulation de tissu et de vêtement est représentée par la figure 2.2. La majorité de ces travaux sont décrits dans les paragraphes suivants, le reste est décrit dans le prochain chapitre.

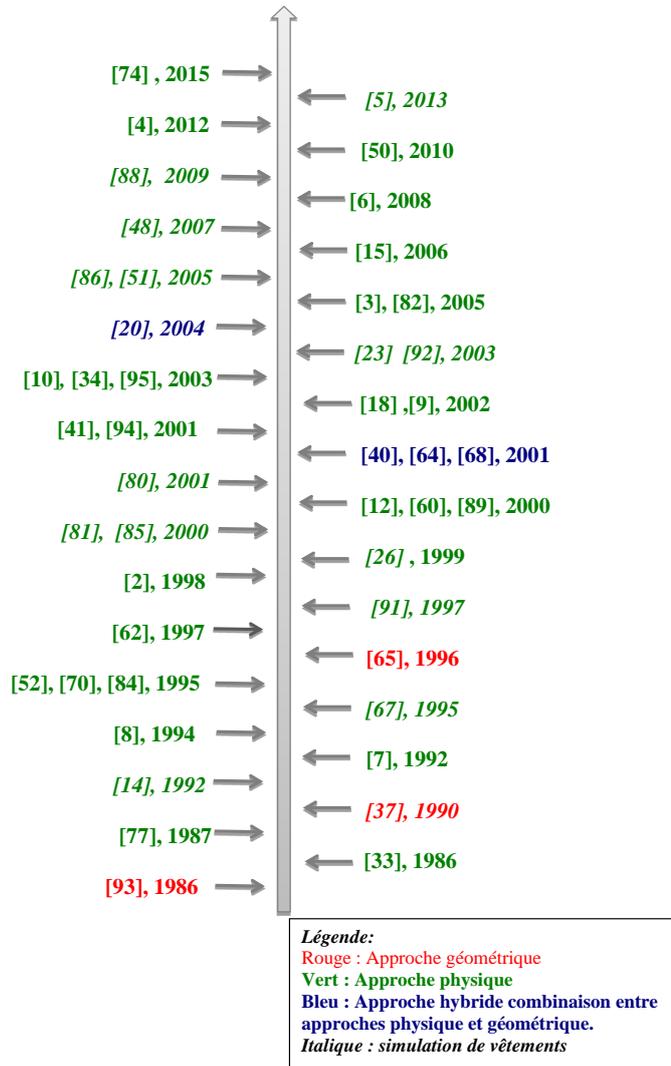


FIGURE 2.2 – Chronologie de quelques travaux de recherche pour la simulation de tissus et de vêtements

### 2.5.1.1 Approches géométriques

Cette approche consiste à simuler les tissus avec des méthodes géométriques. Les modèles géométriques fournissent des techniques qui reproduisent la forme des tissus en utilisant par exemple des surfaces paramétriques pour modéliser les plis des habits. Ils cherchent à reproduire l'aspect visuel d'une représentation fixe des tissus, et ce, sans chercher à quantifier les grandeurs caractéristiques de leur comportement physique. Ces approches peuvent être considérées comme des outils de modélisation. Parmi les travaux utilisant les méthodes géométriques nous citons :

Celui de Jerry Weil qui a fait paraître un article sur le sujet [93]. Il a développé une approche purement 'géométrique' de la représentation des textiles suspendus. La structure de tissu est modélisée comme une grille bidimensionnelle de points géométriques tridimensionnels.

Plus tard, B. K. Hinds et J. McCartney ont présenté dans [37] un système in-

teractif de conception de vêtements tout en permettant à l'utilisateur de créer un modèle géométrique d'un vêtement en indiquant ses contours sur un mannequin, ensuite le vêtement équivalent est généré à partir de la surface de mannequin. Les plis sont ajoutés dans le modèle géométrique.

Jean-Michel Nourrit et al. [65] ont modélisé des textiles à base de maille, pour modéliser un liage, ils ont utilisé des courbes Splines qui déterminent la trajectoire du fil, et dont les points de contrôle sont ajustés en fonction de règles dépendant des paramètres du liage. Le modèle proposé par les auteurs permettra de simuler la plupart des liages réalisables sur des métiers industriels, et pourra être utilisé comme outil de conception de nouveaux modèles.

### 2.5.1.2 Approches physiques

Le tissu peut être considéré comme un objet passif à la différence des êtres humains qui appliquent des forces pour contrôler leurs mouvements. Les mouvements des tissus sont dus à des forces externes et aux réactions définies par les propriétés du textile, ça signifie que l'animation de tissu est relativement bien définie en connaissant les forces externes appliquées aux tissus et en utilisant un bon modèle de leurs réactions mécaniques. La simulation de tel comportement est bien accomplie avec les méthodes basées sur les modèles physiques. Il existe deux classes de modèles physiques : les modèles continus et les modèles discrets.

#### 2.5.1.2.1 Modèles continus

Les modèles continus sont basés sur la théorie de la mécanique des milieux continus. Le milieu, représentant le tissu, est supposé avoir des caractéristiques mécaniques continues. Des relations lient les déformations aux contraintes subies par le milieu. Les déformations représentent l'ensemble des modifications de la géométrie du tissu, par rapport à un état donné (origine des temps, état de repos...). Les contraintes désignent les forces élémentaires s'exerçant en un point du tissu [15]. Parmi les travaux qui ont utilisé ce type de modèle, nous pouvons citer les travaux suivants :

Feynman [33] a modélisé le tissu comme une surface déformable élastique continue. Il a, pour ce faire, défini un ensemble de fonctions d'énergie pour le tissu inspiré de la théorie des plaques élastiques. Ces fonctions d'énergie sont calculées en représentant le tissu par une grille bidimensionnelle de points tridimensionnels. L'idée est de calculer la position finale du vêtement par la minimisation de l'énergie totale. Cette approche ne tient pas compte du comportement de cisaillement du tissu, de l'intersection du tissu avec lui-même ni de son interaction avec des solides.

En s'appuyant sur les principes de la théorie de l'élasticité, Terzopoulos [77] a abordé le problème des corps déformables, les vêtements, en particulier. Sa méthode, du fait de sa nature physique, a permis de fournir des résultats très réalistes. Cependant, son principal inconvénient résidait dans le fait qu'elle nécessite un lourd bagage théorique. Le travail de Cargan [14] est, quant à lui, basé sur l'équation fondamentale du mouvement décrite par Terzopoulos, son but étant d'animer des vêtements portés par des humains virtuels. Volino [84] a, de son côté, repris le modèle de Terzopoulos afin d'implémenter des algorithmes robustes pour la simulation de tissu et de vêtements tout en associant ces algorithmes à un système de traitement des collisions et des auto-collisions.

Bridson a décrit des méthodes qui préservent les plis dans la simulation du tissu [10]. Ces méthodes incluent un schéma d'intégration mixte explicite/implicite, un modèle physique de correction des forces pour la modélisation des plis, une méthode qui prévoit les réponses aux collisions pour améliorer le comportement dynamique du tissu et une technique de pré calcul qui met le tissu dans un intervalle quand il préserve une certaine profondeur et ainsi les plis.

### 2.5.1.2.2 Modèles discrets

Les modèles discrets considèrent, quant à eux, l'objet à décrire comme un ensemble fini de sous-objets plus simples. Les sous-objets sont munis de lois qui régissent leurs interactions internes d'une part, et leurs interactions avec le reste du monde, d'autre part. Ces lois sont souvent issues de la physique et d'un assemblage de sous-objets appelé systèmes de particules [15].

#### Modèles de particules

Les systèmes de particules sont de plus en plus utilisés pour simuler un grand nombre de phénomènes physiques, en particulier les textiles [7, 8, 28, 27]. Le principe consiste à discrétiser le tissu en un maillage polygonal (figure 2.3). Les sommets du maillage sont appelés particules ou masses. La topologie du maillage définit les interactions et les forces exercées entre les particules [95].

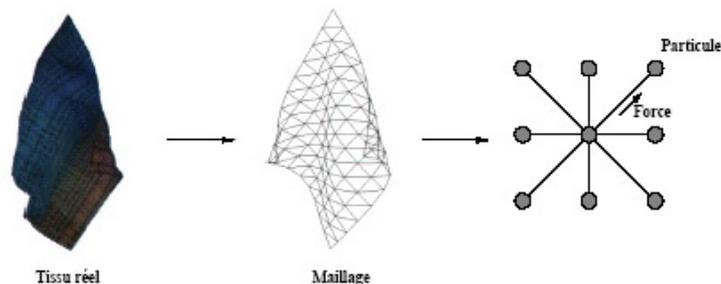


FIGURE 2.3 – Discrétisation du textile en un maillage polygonal. [95]

Les forces inter-particules sont souvent des lois d'attraction-répulsion qui s'apparentent à celles qui existent entre deux atomes et présentent, comme les ressorts, une distance d'équilibre où la force est nulle.

D. E. Breen et al. [7] ont développé un modèle de particule non continue pour la simulation du mouvement de tissu, ce modèle représente explicitement la structure micromécanique du tissu par un système de particules. Leur modèle est basé sur l'observation que le tissu est bien décrit en le représentant comme des pièces mécaniques en interaction, et dérive ses propriétés dynamiques, à l'échelle macro, de l'interaction micromécanique entre les fils de tissu. Les points résultant du croisement entre les fils de textile sont représentés par des particules. Chaque particule interagit avec les particules adjacentes ou avec l'environnement par des connexions mécaniques représentées par des fonctions d'énergie synthétisant les contraintes géométriques et physiques. Les positions successives de ces particules sont déterminées par les minima locaux des fonctions d'énergie. Les auteurs ont amélioré leur modèle dans un autre travail [8] dont ils ont pu obtenir des résultats plus précis en tenant en considération les propriétés mécaniques du tissu.

Volino et al [86, 88] ont proposé un modèle basé sur un système de particules plus précis, dont les trois particules d'un triangle interagissent simultanément. Ce modèle permet la simulation précise de la traction du tissu non linéaire et le comportement du cisaillement, même pour de grandes déformations.

### Modèle masses-ressorts

Il y'a à préciser que parmi les systèmes de particules les plus utilisés, figure le système masse-ressort. Celui-ci est très fréquemment utilisé en informatique graphique pour sa facilité d'implémentation et son efficacité à simuler des objets déformables. Le système masse-ressort le plus utilisé pour la simulation dynamique de vêtements revient à Provot [70] qui a modélisé une pièce de tissu par une structure déformable constituée d'un réseau constitué de masses ponctuelles liées par des ressorts (figure 2.4). Le mouvement du tissu est évalué grâce à l'intégration numérique de la loi fondamentale de la dynamique. Il a décrit les inconvénients de la propriété d'élasticité de ce modèle et a montré que ce problème ne peut pas être résolu par l'augmentation de la raideur des ressorts déformés du fait que celle-ci fait croître le coût de l'algorithme. Il a ainsi proposé une méthode inspirée de la loi de la dynamique inverse pour limiter les trop grands étirements dans le tissu en imposant une distance maximale d'élongation du ressort.

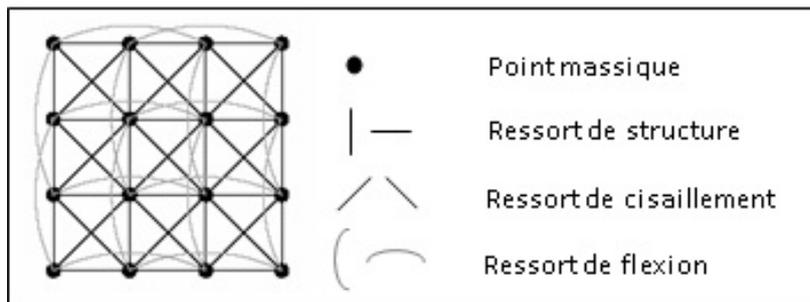


FIGURE 2.4 – Système masses-ressorts de Provot [70]

Par la suite, le modèle de Provot a souvent été utilisé comme base pour les travaux qui visent à améliorer d'autres aspects de la simulation de vêtements tels que la précision et le temps de calcul. Louchet [52] a proposé une définition d'une fonction optimale de mesure de paramètres, alors que Nocent [62] en a proposé, de son côté, une amélioration en appliquant un pas de temps adaptatif. Baraff a présenté un schéma d'intégration implicite [2], alors que Volino a proposé une méthode optimisée pour le calcul des forces avec augmentation du pas de temps [91]. Deux ans plus tard, Desbrun a présenté une amélioration du schéma d'intégration [26] alors que Meyer a proposé un algorithme hybride de schéma implicite/explicite [60].

Burgy a poursuivi en proposant une méthode d'intégration de la multi-résolution en subdivisant les triangles du maillage lorsqu'il y a une imprécision avec basculement dans un seul sens [12]. Kang [41] a proposé une approximation de la méthode d'intégration implicite utilisée par Desbrun [26] et ce, en prenant en considération l'interaction de l'objet avec l'air. Bridson a, par ailleurs, proposé une méthode de gestion des collisions [9] alors que Choi a présenté dans [18] une technique stable de simulation de tissu semi-implicite avec simulation des plis. En parallèle, Villard et Brouchaki ont implémenté un maillage adaptatif utilisant une méthode d'intégration explicite [82].

L'équipe Fuhrmann a proposé le remplacement des forces internes du tissu par des contraintes ainsi qu'un algorithme efficace pour l'évitement des auto-collisions [34]. En même temps, et pour des fins d'accélération, Zara a présenté une méthode d'optimisation utilisant des algorithmes parallèles sur une grappe de PC [95]. De son côté, Benameur a proposé une méthode d'optimisation intégrant la multi-résolution basée sur la subdivision des triangles du maillage permettant l'annulation de la subdivision dans les zones raffinées et suffisamment plates avec basculement dans les deux sens [3]. Charfi a proposé une amélioration au niveau de la modélisation mécanique du tissu et de la détermination de ses paramètres [15]. Lee et al. [50] ont utilisé une combinaison entre un système masse-ressort et le schéma de subdivision Loop pour le raffinement d'un maillage triangulaire. Les différentes résolutions sont pré-calculées pour obtenir une hiérarchie de niveaux de détails. Ceci est utilisé afin de réduire de manière adaptative la dimension du système linéaire qui doit être résolu par une méthode d'intégration implicite.

### 2.5.1.3 Approches hybrides

Cette famille d'approches combine les avantages des deux approches précédentes. L'idée d'utiliser des méthodes basées à la fois sur la physique et la géométrie vient du constat relativement simple. Ce constat considère que les détails de l'habit qui sont les plus coûteux à calculer sont par nature géométriques. Ils peuvent, ainsi, être modélisés avec une surface déformée géométriquement sans perdre la qualité de la simulation. En clair, le comportement global de l'habit est simulé avec un maillage simplifié et les détails sont générés avec une surface paramétrique dont les points de contrôles sont les sommets du maillage simplifié. Cette méthode est rapide, mais son principal inconvénient est la qualité de la forme des plis. Il existe une très grande variété dans la forme de ces plis et il est très difficile de définir une fonction assez générale permettant de modéliser n'importe quel type de plis [20]. Cette catégorie d'approche a été utilisée dans plusieurs travaux de recherche, dans ce qui suit nous citons quelques-uns.

O. Nocent et al. ont introduit dans [64] les bases pour la mise en œuvre d'une nouvelle méthode de niveau de détail mécanique applicable à une simulation des textiles tricotés. En fait, la méthode proposée consiste à procéder à une réduction du nombre de paramètres du textile tricoté, réduisant ainsi la dimension de l'espace des configurations possibles du système étudié.

Prenant comme socle la précédente approche, Kang et al [40] ont proposé une méthode d'animation efficace d'un tissu plissé avec une intégration implicite. En implémentant la méthode, les auteurs ont constaté que l'augmentation de son efficacité est liée à la réduction du nombre de masses du système masse-ressort utilisé. Cependant et puisque cette réduction influe sur la réalité de la simulation, ils ont introduit des courbes Splines cubiques pliées (Wrinkled Spline Curve) qui génèrent des courbes similaires aux courbes Splines cubiques avec des plis selon la distance entre deux points de contrôle adjacents : si cette distance est inférieure à un certain seuil, le segment Spline entre ces 2 points de contrôle doit avoir quelques plis afin de préserver la longueur du segment au repos.

Dans [68], Oshita et al. ont proposé une technique de simulation temps réel de tissu, la méthode combine la simulation dynamique avec une technique géométrique. Un nombre réduit de particules est contrôlé en utilisant une simulation

dynamique pour reproduire le comportement global du tissu. La surface du tissu est ensuite lissée en se basant sur les forces d'élasticité appliquées à chaque particule conjuguées à la distance entre chaque pair de particule adjacent. En utilisant cette méthode géométrique, les auteurs ont pu simuler le comportement local du tissu tel que les plis.

#### 2.5.1.4 Avantages et inconvénients des approches dédiées à la simulation de vêtements.

La table suivante 2.1 illustre les avantages et les inconvénients des approches de simulation de vêtements :

Approches	Avantages	Inconvénients		
Approches géométriques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fournissent des résultats plus rapides que celles basées sur les modèles physiques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sont incapables de reproduire correctement le mouvement dynamique de l'habit.</li> <li>• Nécessitent une intervention considérable de l'utilisateur pour le dessin des vêtements.</li> <li>• Sont limités à une représentation statique des tissus.</li> </ul>		
Approches physiques	Modèles continus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Considèrent le tissu comme un milieu homogène.</li> <li>• Représentent globalement sa surface sans décrire sa mécanique interne.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficulté de déterminer les paramètres mécaniques du modèle. De plus.</li> <li>• Ils nécessitent un lourd bagage scientifique pour la compréhension les équations physiques.</li> </ul>	
	Modèles discrets	Modèles de particules	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisés dans la simulation de grands nombres de phénomènes physiques, en particulier le comportement des textiles.</li> <li>• Modélisent des phénomènes complexes et globaux à partir de lois comportementales simples et locales agissant sur un ensemble de particules interconnectées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'affichage est plus complexe que celui des réseaux masses-ressorts à topologie fixe.</li> <li>• La complexité vient du fait qu'on ne dispose qu'un ensemble de particules, représentant des objets à topologie variable.</li> </ul>
	Modèles masses - ressorts	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très fréquemment utilisé en informatique graphique</li> <li>• Facile à implémenté et efficace dans la simulation des objets déformables.</li> <li>• Sont appliqués à l'animation :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>– de corps inanimés (comme le tissu) ;</li> <li>– de corps organiques actifs (comme les muscles);</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne peuvent pas maintenir un volume constant ou quasi constant pendant la déformation.</li> <li>• Le changement de la densité du maillage, en utilisant les mêmes paramètres des ressorts, est très difficile.</li> <li>• Effet de superélasticité.</li> </ul>	
Approches hybrides	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Méthodes rapides.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il existe une très grande variété de la forme de plis et il est très difficile de définir une fonction assez générale qui permet de les modéliser.</li> </ul>		

TABLE 2.1 – Avantages et inconvénients des approches dédiées à la simulation de vêtements

### 2.5.1.5 Problématique

Les deux points essentiels à prendre en charge dans la simulation de textile sont le réalisme de la simulation du mouvement de tissu et la vitesse de simulation.

#### 2.5.1.5.1 Augmentation de la fidélité de la simulation

Le but essentiel dans la simulation de textile est la production d'un tissu non distinguable de celui du réel. Afin d'aboutir à une modélisation réaliste d'un tissu particulier, il faut extraire les propriétés physiques du tissu et les appliquer au modèle du tissu simulé. Actuellement, les mesures objectives des caractéristiques mécaniques et physiques du tissu sont obtenues par plusieurs technologies, en particulier, par celle du KES-F (Kawabata's Evaluation System for Fabrics), le but des travaux utilisant les mesures des machines de Kawabata est de modéliser un tissu numérique qui reproduit les courbes de Kawabata du tissu réel.

D'autres chercheurs préfèrent estimer les paramètres du tissu en comparant le mouvement dynamique du tissu simulé avec le mouvement d'un tissu réel enregistré avec une caméra.

#### 2.5.1.5.2 Amélioration de la vitesse des algorithmes

Avoir un temps de calcul raisonnable est un autre but dans la simulation de tissu. La vitesse de la simulation peut être améliorée en employant des modèles physiques et des procédures numériques simples. Dans les modèles physiques, il apparaît que le système de particules est le plus simple pour ce type de simulation. D'un autre côté, différentes méthodes sont utilisées pour l'accélération des procédures numériques, dont la plupart sont basées sur la simplification de la méthode implicite. Cependant, toute simplification exige une dégradation de la qualité de la simulation dans une certaine mesure.

En exploitant le fait que les différentes parties du tissu ne doivent pas être simulées avec le même niveau de détails, le temps d'exécution peut être réduit tout en sauvegardant la qualité. L'approche multi-résolution utilise une résolution très fine dans les parties subissant une large déformation et/ou proche de la caméra et une résolution moins poussée pour les autres parties.

D'autres simplifications peuvent être apportées dans les cas où il n'est pas nécessaire de simuler le tissu en entier. Le mouvement des habits serrés dépend du mouvement du corps de l'acteur, par exemple. Cordier et al. sont les premiers à avoir proposé une technique de simulation temps réel basée sur cette idée [21]. L'accélération de la méthode de simulation peut être aussi faite grâce aux nouvelles architectures graphiques, lesquelles combinées avec les algorithmes d'accélération permettraient de produire des simulations de vêtements en temps réel.

### 2.5.1.6 Bilan

Dans le domaine l'animation de tissus et de vêtements, différents modèles ont été utilisés pour représenter les matériaux tissés. Les modèles géométriques, qui sont historiquement les premiers à être apparus, ont très vite montré leurs limites lorsqu'il s'agit de simuler le mouvement d'un tissu. Les modèles physiques représentent le tissu, soit d'une manière continue, soit d'une manière discrète [15].

Dans le modèle continu, le problème essentiel est la difficulté de déterminer les paramètres mécaniques du modèle. De plus, ils nécessitent un lourd bagage scientifique pour la compréhension des équations physiques. Par contre, les modèles discrets décrivent le tissu comme un ensemble fini de particules. Ceci dans le but de modéliser des phénomènes complexes et globaux à partir de lois comportementales simples et locales agissant sur un ensemble de particules interconnectées. Les systèmes masse-ressort sont un cas particulier des systèmes de particules, ils ont été utilisés dans la majorité des travaux de simulation de tissu et de vêtements, car ils sont plus simples à implémenter, présentant néanmoins des insuffisances quant à l'ajustement de leurs paramètres (raideurs des ressorts, masses des points ...).

Certains travaux [2, 91] ont essayé de combiner des modèles réalistes de tissu avec des méthodes d'intégration numérique stable, mais avec un coût de traitement très important. De plus, les schémas d'intégration implicite de ces méthodes ont permis d'utiliser un grand pas de temps, aux dépens d'une complexité exponentielle qui limite le nombre de masse à utiliser dans la simulation.

Les représentations continues simplifiées, telles que les éléments finis du premier ordre, ont récemment été réintroduits, ils ont été exprimés comme des systèmes de particules dont toutes les techniques d'intégration numériques peuvent être utilisées. Pour pouvoir gérer correctement le contexte de grandes déformations propre à la simulation des tissus, des adaptations sont utilisées dans différents travaux [86, 88].

### 2.5.2 La gestion de collisions

La gestion de collisions qui se produisent entre le tissu et le corps humain ou entre des parties d'un même tissu constitue un problème essentiel dans la simulation de vêtements. Ce problème concerne la détection de collisions, c'est-à-dire comment trouver, d'une façon efficace, le contact géométrique entre deux surfaces complexes, d'une part. D'autre part, il y'a lieu de déterminer la réponse à ces collisions, en d'autres termes, comment ce contact géométrique peut-il affecter le comportement du tissu, et comment ce changement s'intègre efficacement dans la simulation [83].

Une collision entre deux objets est détectée s'il existe un instant où les deux objets ont une intersection non vide [59]. Une collision, dans le cas des surfaces flexibles (comme le tissu), est le contact d'une partie du tissu avec une autre partie du même tissu (auto-collision) ou avec un autre objet. Ainsi, lorsqu'une collision est détectée, il faut pouvoir en tirer les informations qui vont permettre de réagir à cette collision : c'est le calcul de la réponse, qui dépend étroitement de l'application.

#### 2.5.2.1 Travaux antérieurs

Plusieurs algorithmes de traitement de collisions ont été proposés, parmi lesquels ceux basés sur les volumes englobants : les objets sont englobés par des primitives simples afin de réduire le nombre de comparaisons. Cette méthode a été initiée par D. Baraff [2] pour la détection de collision entre les particules d'un tissu et les objets solides. Les solides sont englobés par des cubes organisés sous la forme d'un arbre hiérarchique dont les feuilles sont les faces des solides. Pour calculer la

réponse aux collisions, les auteurs ont utilisé une méthode simple qui consiste à modifier la position du sommet en collision en ajoutant un terme de correction dans l'équation qui calcule les positions des particules.

T. Vassilev et al. [81] ont implémenté cet algorithme en utilisant un arbre de volumes englobants dont les feuilles sont les faces de la surface du corps humain et leurs vecteurs normaux. La réponse aux collisions est calculée en modifiant les vitesses des sommets du tissu.

L'efficacité de la hiérarchie des volumes englobants fut améliorée par J. Mezger et al [61] en utilisant une technique adaptative pour la création et le parcours de la hiérarchie. Dans ce travail, les auteurs ont utilisé comme volumes englobants, des polytopes orientés (K-DOPs : Discret Oriented Polytopes) qui sont des polyèdres convexes définis par  $K$  demi-espaces. Les K-DOPs ont été décrits par Klosowsky et al [42] pour lesquels ils ont montré qu'ils présentaient une meilleure convergence que celle obtenue avec les autres volumes englobants. Les polytopes orientés (K-DOPs) ont également été utilisés dans d'autres travaux, dont celui de Volino et al. [83]. Bender et al [4] ont aussi utilisé la hiérarchie des volumes englobants. Leur méthode est basée sur le travail de [9], puisque le tissu dans ce travail est représenté par différents niveaux de détails dont la hiérarchie doit être modifiée à chaque itération. Les auteurs ont préféré d'utiliser une méthode d'accélération basée sur le hachage spatial qui est introduit Teschner et al. [78].

Afin d'accélérer la simulation de vêtement, S. Oh et al. [66] ont approximé la forme des humains virtuels par des quadriques considérées comme des volumes englobants (figure 2.5). Ils ont traité la collision en utilisant une méthode adaptative à la vitesse de mouvement, et ce, en utilisant l'équation implicite de la quadrique dans le cas statique et la méthode d'intersection rayon ' quadrique dans le cas dynamique. Et ceci, en utilisant l'équation de la quadrique et celle de la trajectoire.

T. Vassilev et al [80] ont exploité une autre approche basée sur l'espace image. Cette approche a été utilisée pour la première fois par M. Shinya et al. [75]. Le test de collision tissu/corps se faisant en comparant la valeur de la profondeur des points du vêtement avec l'information correspondante de profondeur du corps stockée dans la matrice de profondeur. Dans ces travaux, la méthode utilisée pour le calcul de la réponse aux collisions consiste à modifier les vitesses des sommets du tissu en collision et ceci en utilisant les coefficients de frottement et de réflexion qui dépendent du type du matériau de l'objet en collision. Cette classe de méthodes est devenue très populaire [36, 1].

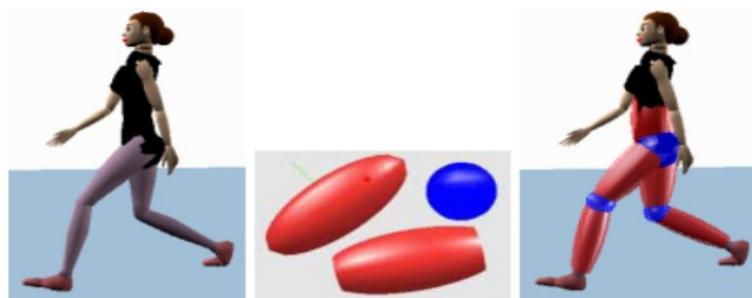


FIGURE 2.5 – Approximation de la forme d'humain virtuel par des quadriques [66]

D'autres travaux ont utilisé des méthodes basées sur la subdivision de l'espace en cubes (voxels), parmi lesquels nous citons celui de D. Zhang [96] à l'occasion

duquel l'auteur s'est proposé d'accélérer les performances de la méthode en choisissant une taille appropriée des voxels. Cette technique a été également utilisée par W. A. McNeely [57], K. Choi et al [18], M. Meyer et al. [60], Larsson et al [46] et Otaduy et al [69]

### 2.5.2.2 Détection de collisions

La détection de collisions est l'étape la plus importante dans la simulation du comportement des vêtements, car elle exige un temps de calcul supérieur à celui nécessaire au calcul du mouvement et des déformations. La détection du contact consiste à calculer la distance entre deux objets. Quand cette distance est négative, les deux objets sont en contact. La distance est dite négative, si les deux objets s'interpénètrent. Le temps nécessaire au calcul de la distance entre deux objets dépend de la forme géométrique de ces deux objets et de leur nature physique (rigide ou déformable) [39]. Dans la majorité des simulations de personnages habillés, le tissu et le corps humain sont représentés par un maillage polygonal contenant des milliers de polygones. La gestion des collisions du tissu avec le corps humain ou avec lui-même (les auto-collisions), consiste à traiter la collision entre chaque sommet et chaque polygone et celle entre chaque paire de segment (figure 2.6).

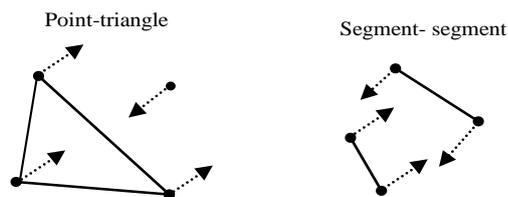


FIGURE 2.6 – Les deux types de collision [71]

La détection de collisions est très coûteuse en termes de temps de calcul. La majorité des travaux actuels ont recours à des méthodes d'optimisation de la détection.

#### 2.5.2.2.1 Détection de collision avec les méthodes de subdivision d'objet

Le principe de ces méthodes consiste à construire une hiérarchie de boîtes englobantes à partir de la surface de l'objet, chaque boîte englobante contenant une partie de l'objet. La détection de collisions se fait en calculant l'intersection entre chaque paire de volumes englobants et ceci en commençant par la racine de la hiérarchie. Si une collision est détectée entre deux volumes englobants, l'algorithme teste la collision dans un niveau de détail plus élevé en descendant dans la hiérarchie [20].

#### 2.5.2.2.2 Détection de collision à base de voxels

Cette approche est basée sur une subdivision récursive de l'espace en cubes de façon à pouvoir identifier les paires d'objets susceptibles d'entrer en collision. L'algorithme commence par la sélection de la taille convenable des Voxels permettant

d'atteindre un grand degré de précision et de performance. Ensuite, il partitionne l'espace en régions (Voxels), dont chaque cube contient un "bit" indiquant si l'espace est occupé par l'objet ou non. Les Voxels sont organisés hiérarchiquement pour former un Octree (figure 2.7).

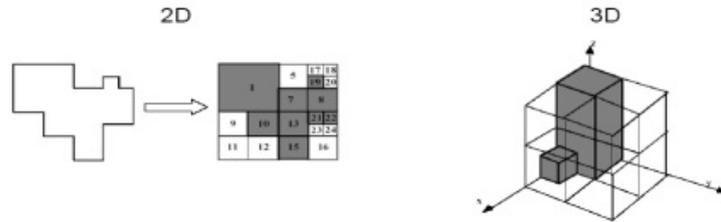


FIGURE 2.7 – Subdivision de l'espace avec des octrees (cas 2D et 3D) [20]

### 2.5.2.2.3 Détection de collision à base d'images

La détection de collisions à base d'images consiste à utiliser un processeur graphique pour réduire le temps de calcul. Grâce à ce processeur, un calcul de rendu du vêtement peut être fait très rapidement et utilisé pour savoir si le vêtement touche le corps. Vassilev et al. [80] ont implémenté cette méthode pour la détection de collisions en temps réel entre les vêtements et le corps humain, en comparant la profondeur des points des vêtements avec celle du corps. Dans cette approche, le rendu du corps humain (faces avant et arrière) scanné est fait avec les couleurs représentant les normales du corps, ceci est fait en faisant correspondre à chaque valeur du vecteur normal (x, y, z) une couleur (R, G, B).

Le processus de rendu génère deux tampons de profondeur et deux frame-buffers pour les deux faces avant et arrière du corps. Pour la détection de collision, les auteurs font la conversion des coordonnées des sommets des vêtements en index dans les tampons de profondeur et des normales. Le test de collision est réalisé en comparant la valeur z des coordonnées du sommet avec la valeur correspondante dans le tampon de profondeur. La direction de collision est approximée avec la matrice des normales. Pour augmenter la performance de la simulation, les matrices de profondeur et des normales sont calculées dans une étape préalable de prétraitement.

### 2.5.2.2.4 Détection de collision avec les surfaces implicites

Cette technique est basée sur les surfaces implicites [72]. Les surfaces implicites sont des surfaces iso-valeurs créées par un mélange de primitives (points, lignes, polygones, sphères, ellipses, etc.) représenté par des équations implicites de la forme :  $F(x, y, z) = 0$ . L'animation des surfaces implicites est obtenue par le contrôle des positions des primitives [20].

La table suivante illustre les avantages et les inconvénients de ces méthodes

Méthode	Avantages	Inconvénients
Détection de collision avec les méthodes de subdivision d'objet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Généralement utilisées dans le cadre de simulation de vêtements où le temps de calcul ne représente pas une contrainte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A chaque déformation du vêtement, il faut mettre à jour l'arborescence.</li> </ul>
Détection de collision à base de Voxels	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moins coûteuse en temps de calcul puisque le test est réduit aux régions occupées par des objets et dans la même hiérarchie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessite aussi la mise à jour de la hiérarchie à chaque modification de la forme du vêtement.</li> </ul>
Détection de collision à base d'images	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendu très rapide.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne permet pas de calculer les auto-collisions générées par les vêtements.</li> </ul>
Détection de collision avec les surfaces implicites	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avantage principal : possibilité de calculer de façon instantanée si un point est à l'intérieur ou à l'extérieur du volume défini par la surface.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne peut être utilisée que pour le calcul de détection sur des volumes, c'est à dire sur le corps seulement.</li> </ul>

TABLE 2.2 – Avantages et inconvénients des méthodes de détection de collision

### 2.5.2.3 Réponses aux collisions

La réponse aux collisions vise à reproduire les interactions entre les objets d'une façon précise. Elle consiste à trouver les nouvelles positions et vitesses des objets en collision et ceci dans le but d'éviter les interpénétrations irréalistes des objets et de simuler des effets réalistes de rebondissement et de frottement. Deux classes de méthodes de réponses aux collisions ont été développées dans le domaine de simulation de vêtements, la méthode de pénalité et celle des contraintes.

#### 2.5.2.3.1 Méthodes des pénalités (Penalty forces)

Il s'agit donc de détecter toute collision, et de placer un ressort virtuel de longueur à vide nulle au niveau de chaque collision (figure 2.8). Ce dernier va induire une force répulsive qui va avoir tendance à faire ressortir les deux objets l'un de l'autre. La force générée dépend de la valeur de l'interpénétration fictive entre les deux objets. [20, 58].

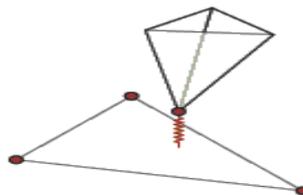


FIGURE 2.8 – Illustration de la méthode des pénalités [20]

### 2.5.2.3.2 Méthodes des contraintes dynamiques

Elles consistent à représenter la force de la collision par une contrainte de non-pénétration et à prendre en compte explicitement cette contrainte dans l'équation du mouvement. Ceci est fait en modifiant les forces du tissu afin d'éviter sa collision avec le corps humain.

Cette classe de méthodes a été utilisée dans différents travaux et a prouvé sa précision. Parmi ces travaux, nous citons celui de D. Baraff et A. Witkin [2] qui ont traité les collisions en modifiant les positions des sommets du tissu en collision et ceci en ajoutant un terme de correction. Ce terme de correction est en fait une valeur arbitraire choisie par le programmeur, cette valeur est associée à l'équation qui calcule la nouvelle position des particules.

L'idée de T. Vassilev et al. [81, 80] consistait à modifier les vitesses des particules du tissu en collision au lieu de modifier ses positions. Dans cette méthode, la vitesse résultante est calculée en utilisant des coefficients de frottement et de réflexion qui dépendent du type du matériau de l'objet en collision. La méthode des contraintes a été également choisie par F. Cordier [20], et pour laquelle il a modifié la vitesse et l'accélération qui induisent, ainsi, la modification de la position. Le principe de sa méthode consistait à représenter la vitesse (ou l'accélération) par ses deux composantes (tangentielle et normale) et à annuler ensuite la composante normale (figure 2.9).

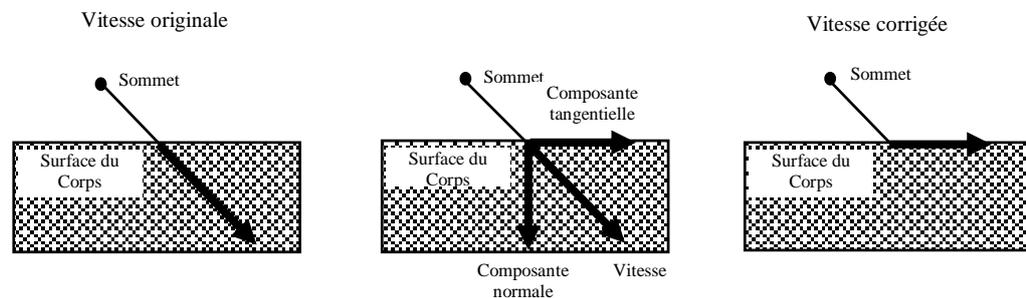


FIGURE 2.9 – Correction de la vitesse [20]

Les avantages et les inconvénients de ces méthodes sont cités dans la table suivante :

Méthode	Avantages	Inconvénients
Méthodes des pénalités (penalty forces)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Méthodes simples et faciles à implémenter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficultés d'ajuster les forces des ressorts, car une faible force risque de ne pas séparer les objets tandis qu'une grande force peut causer un flottement des objets.</li> <li>• Nécessitent la génération de forces adéquates pour éviter les collisions, ce qui rend les équations différentielles de la simulation trop rigides.</li> <li>• Cette rigidité des équations différentielles peut causer une instabilité dans la simulation quand elles sont résolues par des méthodes numériques.</li> </ul>
Méthodes des contraintes (constraint dynamics)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Méthodes préférables, car elles offrent des réponses précises aux collisions sans utilisation de forces de grande puissance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficultés de choisir le paramètre à modifier (position, force ou vitesse) et le terme de correction.</li> </ul>

TABLE 2.3 – Avantages et inconvénients des méthodes de réponses aux collisions

#### 2.5.2.4 Problématique

La nature physique du tissu, qui est un matériau déformable, ne permet pas aux algorithmes de gestion de collisions de fournir le rendu le plus satisfaisant que cela soit en termes de rapidité de calcul ou de qualité de simulation. Dans cette section nous présentons les facteurs, proposés par Choi et al [17], qui compliquent ces algorithmes, les solutions proposées et les problèmes qui nécessitent davantage d'investigations de recherche.

##### 2.5.2.4.1 Détection de collisions rapide

Le tissu est un matériau flexible qui peut subir de très grandes déformations. Par conséquent, les mouvements auxquels il peut être soumis peuvent entraîner plus de collisions que ceux auxquels peuvent être soumis des objets volumiques. La détection de collision nécessite ainsi un temps de calcul élevé du fait que le maillage utilisé dans la simulation du tissu contient un nombre très élevé de triangles ou de rectangles. Dans les algorithmes de détection de collision, l'opération la plus coûteuse est la procédure de test des collisions entre chaque paire d'objets. Parmi les approches utilisées pour la réduction du nombre de paires d'objets, nous pouvons citer celle des volumes englobants hiérarchiques [2, 81, 61, 83]. Cependant, ce schéma n'est pas utile pour les objets hautement déformables tels que le tissu,

car la hiérarchie doit être mise à jour à chaque intervalle de temps. Une autre approche consiste à réduire le nombre de tests de collisions en associant au tissu des conditions géométriques telles que la courbure de la surface, ou le mouvement du corps humain qui provoque le mouvement des vêtements [22, 90]. Cette approche a donné de bons résultats, mais nécessite une étude approfondie [17].

### 2.5.2.4.2 Détection de collisions précise

La structure fine du tissu ne permet pas aux algorithmes simples, de détection de collisions, de capturer toutes les collisions même lorsque le mouvement du tissu est lent. Le problème de non-détection de collisions est généralement lié à une erreur numérique induite par la difficulté de résolution des équations numériques. Une erreur de détection de collisions quand il n’y a pas de collision ne représente pas un problème important. Le problème réside dans le cas où cette erreur s’est produite quand il y a une collision. En définitive, une résolution incorrecte de collision réduit les performances de la simulation.

Actuellement, les erreurs dans les algorithmes de détection de collisions constituent le problème essentiel dans la simulation dynamique des vêtements. Ces aspects entrent dans le cadre des préoccupations directes liées au développement d’algorithmes précis de simulation de vêtements.

### 2.5.2.4.3 Génération robuste de réponses aux collisions

Une fois une collision détectée, les conséquences de cette simulation doivent être reproduites pour générer le mouvement suivant du tissu. Ce processus est qualifié de génération d’une réponse aux collisions, qui doit être traitée d’une manière satisfaisante. Parmi les problèmes rencontrés, nous citons celui où la résolution d’une collision peut provoquer de nouvelles collisions. Pour qu’une méthode de traitement de collisions soit robuste, il faut appliquer cette méthode plusieurs fois jusqu’à ce qu’aucune collision ne soit détectée. Cette approche itérative est juste du point de vue théorique, mais elle a un inconvénient majeur : le processus itératif nécessite beaucoup de temps.

Aujourd’hui, ce problème est résolu en imposant un nombre fixe d’itérations. Ceci est possible en regroupant les particules incluses dans de multiples collisions et en traitant ensuite le groupe comme étant un objet rigide. Cependant, le traitement d’une partie du tissu comme un objet rigide peut induire des effets irréalistes dans le mouvement du tissu. Il y’a lieu donc de développer des techniques de traitement de collisions qui réduisent ou annulent totalement les collisions induites après le traitement de collisions.

### 2.5.2.5 Bilan

La gestion de collisions est un problème fondamental dans le domaine de la simulation comportementale, plus particulièrement pour le cas des vêtements qui sont des surfaces déformables. Elle constitue à elle seule un axe de recherche de prédilection. Cet axe concerne la détection de collisions qui se produisent entre le tissu et le corps humain, ou le tissu lui-même (auto-collision) et la réponse aux collisions. Différents travaux ont abordé ce domaine de recherche dans le but d’améliorer la qualité du rendu et/ou la rapidité de calcul. L’étude que nous avons entreprise, sur les travaux passés et en cours, nous a permis de déceler les facteurs qui

compliquent le traitement de collisions.

Le tissu est un objet déformable, son mouvement peut entraîner davantage de collisions. Généralement modélisé par un maillage triangulaire ou rectangulaire, ce qui rend le test de collision plus coûteux en terme de temps de calcul. De plus, sa structure fine ne permet pas de détecter toutes les collisions durant la simulation. Le problème essentiel dans le traitement de collisions en animation de tissu est que la résolution d'une collision peut provoquer de nouvelles collisions.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les étapes clés de la modélisation et de la simulation de tissus et de vêtements. La première étape est la détermination d'un modèle mécanique capable de reproduire le même comportement qu'un tissu réel ou au moins un comportement plausible, selon l'application visée. À travers la littérature, la modélisation de tissu se base, de plus en plus, sur des modèles physiques qui sont soit continus ou se basant sur la théorie de la mécanique des milieux continus, soit discrets (système masses-ressorts, système de particules). La deuxième étape concerne la gestion de collision qui se produit entre le tissu et les objets de la scène ou entre le tissu lui-même (auto-collision). Les travaux de recherche en cours essaient de traiter les problèmes liés aux collisions. Dont une partie donne la priorité à la précision de la détection de collision alors que l'autre partie privilégie la vitesse de calcul.

A cet effet, nous avons donné une présentation générale des défis auxquels sont confrontées les recherches dans le domaine de la simulation de vêtements. L'utilité de la simulation de vêtements n'est pas limitée au domaine de l'animation par ordinateur. Une fois que la simulation de mouvement de tissu devient plus réaliste, son introduction dans d'autres domaines de la vie quotidienne devient nécessaire, notamment dans la conception de vêtements et les industries de textiles. Le but principal des travaux de recherche dans ce domaine est donc, de développer des modèles permettant d'accélérer les algorithmes de simulation, qui offrent la possibilité de générer des comportements réalistes de vêtement et qui soient capables de concevoir et de simuler des vêtements plus complexes. La représentation multi-résolution (représentation du tissu par différents niveaux de détail) permet sensiblement de réduire le temps de calcul. Le prochain chapitre concerne donc l'exploitation de la multi-résolution dans ce domaine.

# Exploitation de la multi-résolution dans la simulation de tissus et de vêtements

## Sommaire

---

3.1	Introduction . . . . .	<b>25</b>
3.2	Notions fondamentales . . . . .	<b>25</b>
3.2.1	Maillages polygonaux . . . . .	25
3.2.2	Régularité . . . . .	26
3.2.3	Critère de Delaunay . . . . .	26
3.2.4	La multi-résolution . . . . .	27
3.2.5	Les modèles multi-résolution . . . . .	29
3.3	Travaux exploitant la multi-résolution . . . . .	<b>30</b>
3.3.1	Adaptive refinement for Mass/spring simulation [38] . . . . .	31
3.3.2	Intégration de la multi-résolution dans un système de déformation masse-ressort [12] . . . . .	33
3.3.3	Implémentation d'une méthode d'intégration de la multi-résolution dans un système masse-ressort : application à l'animation de tissu [3] . . . . .	34
3.3.4	Cloth Animation with Adaptively Refined Meshes [51] . . . . .	35
3.3.5	Adaptive meshing for cloth animation [82] . . . . .	37
3.3.6	Fast Virtual Cloth Energy Minimization [48] . . . . .	38
3.3.7	Towards Efficiency in Cloth Simulation [6] . . . . .	39
3.3.8	Efficient cloth simulation using an adaptive finite element method [4] . . . . .	40
3.3.9	Fast and stable cloth simulation based on multi-resolution shape matching [5] . . . . .	41
3.3.10	Multiresolution cloth based on animation instances [74] . . . . .	41
3.4	Récapitulatif . . . . .	<b>42</b>
3.5	Conclusion . . . . .	<b>43</b>

---

## 3.1 Introduction

**L**A simulation de vêtement a reçu une attention intensive en infographie dans plus d'une trentaine d'années. Des progrès significatifs ont été réalisés en animation réaliste de vêtement. Néanmoins, il reste une tâche de calcul. Il est évidemment souhaitable d'améliorer la performance et l'efficacité des systèmes d'animation de tissu. Cette amélioration est souvent obtenue en affectant le taux du réalisme, en utilisant soit une simplification sur le modèle physique ou sur la méthode d'intégration.

La combinaison des modèles réaliste de tissu avec les méthodes d'intégration numérique stable nécessite un temps de traitement très important. Bien que les schémas d'intégration implicite nous permettent d'utiliser un grand pas de temps, mais la complexité de ces méthodes, qui est exponentielle limite le nombre de masse à utiliser dans la simulation. Il faut pour cela mettre en œuvre une optimisation dont la multi-résolution fait partie. La multi-résolution est la représentation d'un objet avec des niveaux de détails plus ou moins simplifiés selon les besoins de l'utilisateur et le type d'application. La méthode consiste à simplifier la géométrie des objets, à en produire plusieurs représentations puis à visualiser le modèle à l'aide d'un algorithme qui répond à des critères bien définis.

Les maillages polygonaux sont utilisés pour visualiser une scène tridimensionnelle. Ils permettent la modélisation d'environnements réels ou imaginaires et offrent un certain confort pour l'animation et la navigation « temps réel ». Quelle que soit l'application, le maillage d'une surface est utilisé à un moment ou à un autre pour créer une image. La création rapide d'une image de qualité est grandement facilitée lorsque le maillage est représenté par différents niveaux de détails c'est-à-dire en employant la multi-résolution. La qualité d'un maillage pourra faire intervenir le nombre de mailles minimum nécessaires pour une précision de résolution donnée.

## 3.2 Notions fondamentales

Dans cette section nous avons présenté quelques notions fondamentales relatives au domaine.

### 3.2.1 Maillages polygonaux

Un maillage polygonal correspond à la représentation de la surface d'un objet. Il est composé de faces, c'est-à-dire d'un ensemble d'éléments polygonaux qui peuvent être des triangles, des quadrangles ou des polygones quelconques. Le maillage le plus utilisé dans la majorité des travaux est le maillage triangulaire, de par leur simplicité, leur flexibilité et leur omniprésence. Un maillage triangulaire est composé d'un ensemble de faces triangulaires reliées entre elles. On trouve dans la littérature certaines dénominations pour ces sommets comme les nœuds, les vertex ou les vertices. Les sommets sont reliés entre eux par des arêtes (aussi appelées arcs). Les sommets donnent une information géométrique du maillage, les arêtes apportent une information topologique.

### 3.2.2 Régularité

Un maillage est régulier lorsque chaque sommet le composant (sauf ceux des bords) possède un nombre de voisins constant. À l'inverse, un maillage irrégulier disposera de sommets dont le nombre de voisins est variable (figure 3.1)

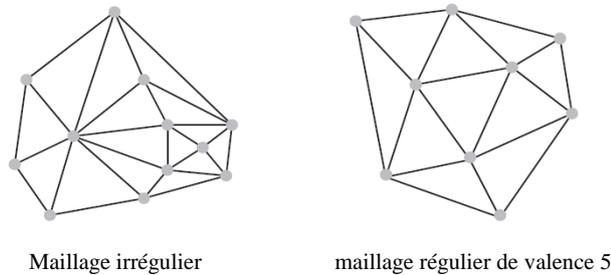


FIGURE 3.1 – Régularité du maillage [25]

Un maillage semi-régulier correspond à un maillage irrégulier où chacun des triangles le constituant possède un maillage régulier (Figure 3.2). Ce type de maillage est très utilisé dans le cadre de la multi-résolution [49]. Il permet de stocker les informations topologiques minimum à chaque niveau de résolution. Une technique de subdivision quaternaire (schéma de subdivision polyédrale) permet de rendre implicites les informations topologiques nécessaires pour passer d'une résolution à l'autre. La figure 3.2 fait apparaître ce principe avec la subdivision des triangles du maillage de gauche en quatre sous-triangles.

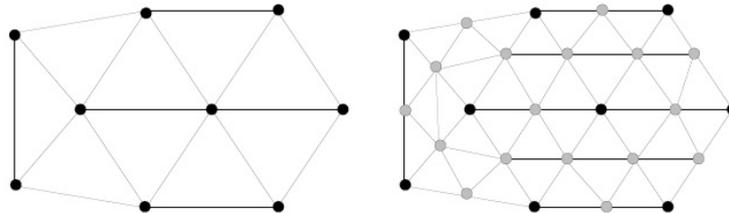


FIGURE 3.2 – Maillage irrégulier et maillage semi-régulier (en noir les sommets irréguliers, en gris, les sommets réguliers). [25]

### 3.2.3 Critère de Delaunay

Certains maillages triangulaires respectent le critère de Delaunay qui veut que l'ensemble des cercles circonscrits aux triangles formant le maillage ne contiennent aucun sommet (Figure 3.3) [25].

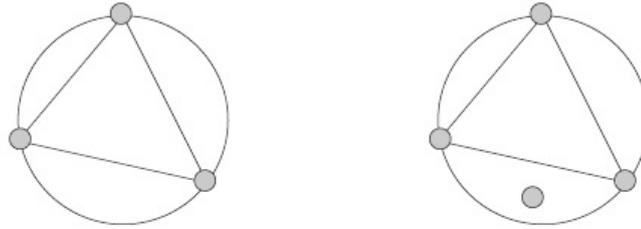


FIGURE 3.3 – Triangle Delaunay (à gauche), triangle non-Delaunay (à droite) [25]

Le diagramme de Voronoï apparaît comme le dual de la triangulation de Delaunay ; il est une décomposition particulière d'un espace métrique déterminée par les distances à un ensemble discret d'objets (généralement des points) de l'espace [25]. La figure 3.4 illustre les différentes étapes de la création d'un maillage à partir d'un nuage de points en utilisant le diagramme de Voronoï et la triangulation de Delaunay.

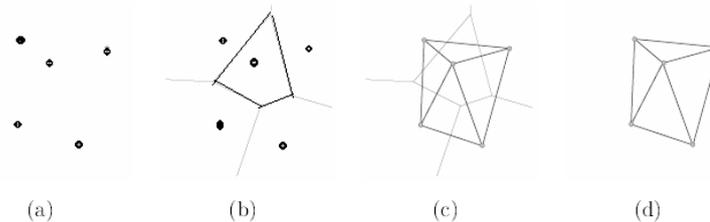


FIGURE 3.4 – Création d'un maillage à partir de la triangulation de Delaunay : (a) Nuage de points, (b) diagramme de Voronoï, (c) triangulation de Delaunay et (d) maillage triangulaire. [25]

### 3.2.4 La multi-résolution

La multi-résolution est une approche classique en synthèse d'images, et en informatique en général. Elle permet de concentrer les calculs là où ils sont le plus nécessaires en raffinant les zones d'intérêt. D'après François Faure [32], le terme multi-résolution est le plus général et qualifie toutes méthodes utilisant plusieurs résolutions. Que la résolution soit fixe ou varie au cours de l'animation.

Chaque résolution représente un niveau de détail. Réaliser un niveau de détail d'un élément consiste à en construire une version moins complexe géométriquement, c'est-à-dire comportant moins de facettes [79]. Il s'agit donc d'afficher des versions plus ou moins dégradées de l'objet selon certains critères tels que la distance entre la caméra et l'objet ou la taille de l'objet à l'écran. L'emploi d'une représentation moins complexe de l'objet peut nous offrir une meilleure célérité d'affichage par rapport à l'utilisation d'une représentation plus complexe

Dans le cadre de l'exploitation de la multi-résolution dans la simulation de tissus et de vêtements, nous avons besoin de générer les résolutions (les niveaux de détails) au cours de l'animation, il faut faire donc recours aux deux techniques suivantes : la simplification polygonale et la subdivision adaptative.

### 3.2.4.1 La simplification polygonale

L'objectif d'un algorithme de simplification polygonale est de prendre un modèle détaillé avec un nombre important de polygones et de générer un modèle plus simple avec un nombre inférieur de polygones qui apparaît semblable au modèle d'origine, tout en conservant leurs importantes caractéristiques visuelles. L'avantage de la représentation simplifiée est qu'elle peut être rendue plus rapidement qu'un modèle original [19]. La simplification polygonale peut créer différents niveaux de détails comme ceux illustrés dans la figure suivante :

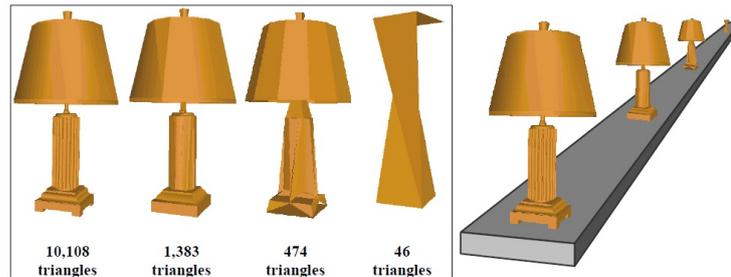


FIGURE 3.5 – Gestion de la complexité d'un modèle en faisant varier le niveau de détail utilisé pour le rendu de petits objets ou des objets éloignés.[53]

### 3.2.4.2 Subdivision Adaptative (Adaptative Subdivision)

Les algorithmes de subdivision adaptative consistent à trouver un maillage de base simple qui peut être subdivisé de manière récursive, en ajoutant des détails à certains endroits du modèle, et ceci afin qu'il approxime de plus en plus le modèle initial. Cette approche fonctionne mieux lorsque le modèle de base est facile à trouver, par exemple, le modèle de base d'un terrain est généralement un rectangle. Atteindre une haute-fidélité sur les modèles polygonaux exige la création d'un modèle de base qui capture des caractéristiques importantes du modèle d'origine, ce qui peut être difficile. Les méthodes de subdivision adaptative préservent la topologie de surface, ils sont bien adaptés pour la modélisation multi-résolution, puisque les modifications apportées aux niveaux bas des subdivisions se propagent naturellement à des niveaux plus élevés [53].

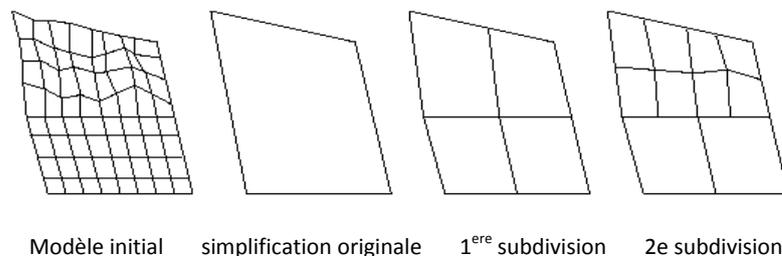


FIGURE 3.6 – Exemple de subdivision adaptative [43]

### 3.2.5 Les modèles multi-résolution

Un modèle multi-résolution est une représentation d'un modèle qui capture un grand nombre d'approximations d'un objet pouvant être utilisés pour reconstruire chacun de ces modèles sur demande. Le coût de reconstruction des approximations devrait être faible parce que nous devons souvent utiliser différentes approximations au cours de l'exécution. Il est également important qu'une représentation multi-résolution ait à peu près la même taille que l'approximation la plus détaillée. Il existe deux approches de création de surfaces multi-résolution, l'une étant discrète et la seconde étant continue [35].

#### 3.2.5.1 Multi-résolution discrète (Niveaux de détails statiques)

L'approche traditionnelle utilisée pour accélérer le rendu en exploitant la multi-résolution consiste à créer plusieurs versions discrètes de chaque objet dans une étape de prétraitement, dont chacune a un niveau de détail différent. Au moment de l'exécution, le niveau de détail approprié, est choisie pour représenter l'objet. Puisque les objets distants utilisent des niveaux de détails beaucoup plus grossiers, le nombre total de polygones est réduit et la vitesse de rendu accrue. Vu que les *NDDs* sont calculés hors-ligne au cours d'une étape de prétraitement, cette approche peut être appelée Niveaux de détails statiques.

- **Avantages :**

- L'avantage le plus important des *NDDs* statiques est la simplicité de programmation. Il y a une séparation entre l'algorithme de simplification et celui du rendu.
- L'algorithme de simplification peut générer des *NDDs* sans tenir compte des contraintes de rendu en temps réel et la tâche d'exécution de l'algorithme de rendu se réduit simplement aux choix du *NDD* le plus approprié.
- prétraitement peut générer de meilleures représentations qui s'adaptent avec le matériel graphique existant.

- **Inconvénients :**

- Le principal inconvénient des modèles multi-résolution discrets est que les niveaux de détail disponibles au moment de l'exécution sont limités. L'algorithme du rendu serait forcé de choisir un des modèles pré-générés, même s'il avait besoin d'un niveau intermédiaire. Ainsi, il devrait soit choisir un modèle sans suffisamment de détails (et le sacrifice sera dans la qualité d'image) ou choisir un modèle avec un plus de détail (donc une perte du temps).
- Chaque représentation doit être stockée indépendamment, la taille de la mémoire nécessaire pour le stockage des représentations augmente avec le nombre de *NDDs* stockés.
- Le nombre de *NDDs* qui peuvent être générés est fixé a priori.

#### 3.2.5.2 Mutirésolution continue (Niveaux de détails dynamiques)

Cette approche nécessite la création d'une structure de données à partir de laquelle tout niveau de détail souhaité peut être extrait au moment de l'exécution. Selon la complexité de la structure de donnée, il est possible d'obtenir un petit ou grand nombre de maillages à différentes résolutions. Cette approche doit être capable de générer la résolution désirée dans un temps très court (temps réel). De plus, la transition entre les différentes résolutions ne doit pas être perceptible.

- **Avantages :**

- Le NDD pour chaque objet est spécifié exactement plutôt que choisi parmi quelques niveaux pré-crés.
- Les NDDs dynamiques ajustent les détails graduellement et avec augmentation, en réduisant la passe visuelle.
- Le nombre de NDDs qui peuvent être gérés n'est pas fixé à priori, il varie selon les besoins de l'application et de l'utilisateur.

- **Inconvénients :**

- Requière un espace mémoire et un temps de calcul supérieur à celui des NDDs statiques.
- Nécessite des algorithmes efficaces pour la gestion des structures de données contenant les informations sur les NDDs et pour le basculement entre ces NDDs.

Le choix de la méthode de représentation multi-résolution dépend de la nature des objets animés, de la nature du mouvement et du taux de réalisme qu'on souhaite obtenir. Pour mettre en 'uvre une optimisation dans une scène animée comme l'intégration de la multi-résolution, il faut tout d'abord choisir l'objet à animer. Nous nous sommes intéressés à la simulation de tissu pour cela nous allons dans ce qui suit présenter quelque travaux ayant choisie la multi-résolution comme méthode d'optimisation.

## 3.3 Travaux exploitant la multi-résolution

Le coût de calcul dans la simulation de vêtements dépend directement de la résolution du maillage, qui détermine la finesse des détails des vêtements, c'est-à-dire les plis. La majorité des méthodes de simulation de vêtements utilise un maillage à résolution uniforme, bien que, les détails géométriques ne sont pas répartis uniformément. La distribution des nœuds de maillage de surface de tissu selon le niveau de détail pourrait sensiblement réduire le coût de calcul.

En se basant sur ce principe, plusieurs chercheurs ont exploité la représentation multi-résolution dans l'animation de tissu et de vêtement pour améliorer le temps d'exécution. Ces travaux sont classés selon le mécanisme d'implémentation choisi, c'est-à-dire comment ils traitent la topologie, et quelle est l'approche choisie dans la génération des niveaux de détails (statique ou dynamique). Le but de cette section n'est pas de fournir une liste exhaustive des travaux dans le domaine de la représentation multi-résolution, ni pour sélectionner les meilleurs travaux publiés,

mais plutôt de décrire brièvement quelques méthodes qui couvrent le domaine, afin d'expliquer le principe de l'utilisation des niveaux de détails.

### 3.3.1 Adaptive refinement for Mass/spring simulation [38]

D. Hutchinson, M. Preston et T. Hewitt ont introduit la multi-résolution dont ils ont ajouté localement des masses et des ressorts pour raffiner le système aux endroits où la surface est irrégulière. Leur but c'était la résolution des problèmes de systèmes masse-ressort statiques.

#### 3.3.1.1 Les problèmes de systèmes masse-ressort statiques

Dans le système masse-ressort statique, c'est-à-dire la résolution du maillage ne change pas au cours du temps, le graphiste doit spécifier la résolution du grillage pour l'application dont il a besoin. Ce paramètre difficile à choisir est pourtant crucial. Une grille trop raffinée risque d'allonger le temps de calcul de manière déraisonnable tandis qu'un système trop grossier donnera des résultats inadéquats. De plus, un système statique comporte des particules superflues à certains endroits où la surface est plate, ce qui ralentit inutilement la simulation.

#### 3.3.1.2 Principe de la méthode

D. Hutchinson a représenté le système comme un maillage de  $m \times n$  carrés. Au cours de la simulation, lorsque deux arêtes contigües (et opposées) forment un angle trop grossier, chacun des quatre carrés autour du point correspondant (entre les deux arêtes) est divisé en quatre. Toutes les masses faisant partie des quatre carrés sont d'abord remises à l'état précédent, soit au moment où leur état était encore correct. Ensuite, la subdivision est effectuée, puis les positions des masses sont recalculées avec la nouvelle configuration géométrique de la zone. La figure 3.7 montre le déroulement d'une subdivision

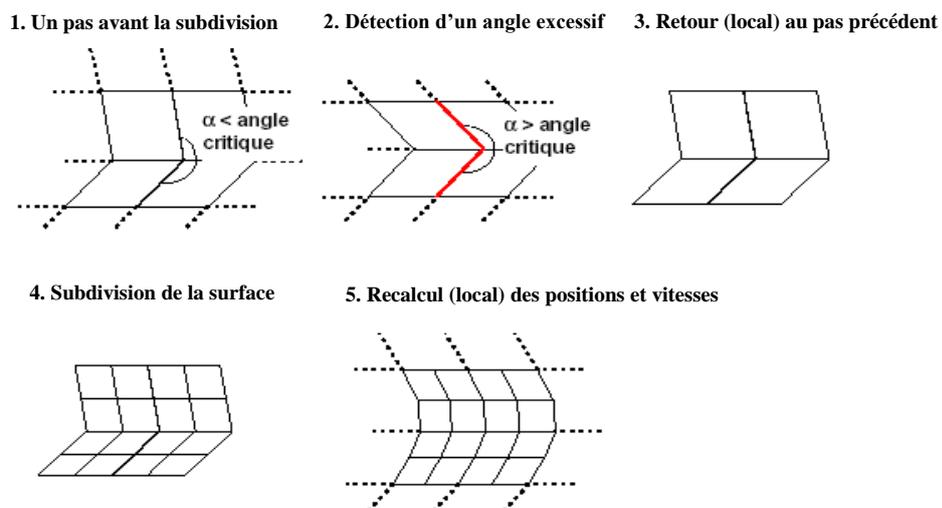


FIGURE 3.7 – Déroulement d'une subdivision [12]

Pour développer sa méthode, Hutchinson a défini trois propriétés que le système doit toujours remplir pour avoir un comportement cohérent. Ces critères se basent notamment sur les caractéristiques des systèmes masse-ressort statiques, composés de masses et de ressorts identiques.

1. Les particules du système doivent se comporter de manière identique par rapport aux forces. Dans ce contexte, des problèmes ont été rencontrés en simulant des particules de masses différentes.
2. Répartition des masses homogène ; la somme des masses sur une certaine zone du maillage doit rester constante, notamment après l'ajout de nouveaux points.
3. La vitesse de propagation des forces à travers le tissu doit être identique partout sinon la simulation devient incohérente. d'une imprécision

#### 3.3.1.3 La méthode de subdivision

Huit nouveaux points sont ajoutés autour du point considéré (Figure 3.8). De ce fait, les quatre carrés qui l'entourent sont remplacés par 16 nouveaux carrés ayant une aire 4 fois plus petite. Quant aux points ajoutés à l'extérieur (carrés blancs), ils sont interpolés d'après les points les entourant (cercles blancs). À noter également que les positions et vitesses initiales des nouveaux points (ronds noirs sur la figure 3.8) sont interpolées d'après les points les entourant (en diagonale).

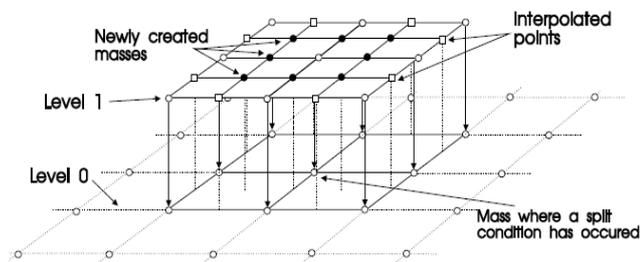


FIGURE 3.8 – Schéma hiérarchique de deux niveaux de subdivision [12]

Ce dernier aspect est important : un point est interpolé tant que l'autre carré incident n'a pas été subdivisé au même niveau (figure 3.9). Cette mesure permet d'éviter que des carrés se déforment durant la simulation, c'est-à-dire que des polygones de plus de quatre côtés apparaissent [12].

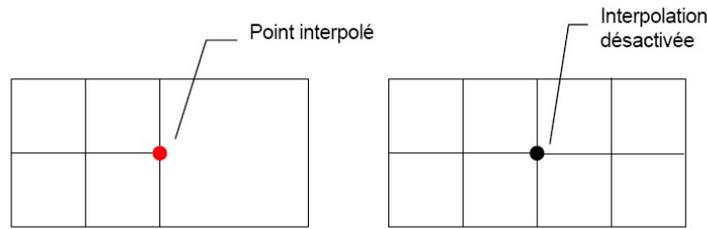


FIGURE 3.9 – Changement d'état d'un point interpolé après la subdivision carrée [12]

### 3.3.2 Intégration de la multi-résolution dans un système de déformation masse-ressort [12]

Dans le même cadre d'idée P. Burgy [12] a développé le même système en montrant que l'utilisation d'un maillage rectangulaire est trop restrictive pour une utilisation des cas concrets : en général, on rencontre des formes en trois dimensions et non rectangulaires (par exemple des habits). La solution qu'il propose est donc la représentation des systèmes masse-ressort par un maillage triangulaire comme dans la figure 3.10.

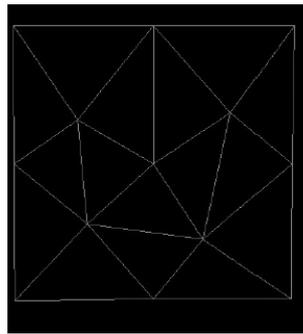


FIGURE 3.10 – Maillage triangulaire [12]

#### 3.3.2.1 Critères de subdivision

On mesure l'angle entre deux triangles ayant une arête commune (figure 3.11).

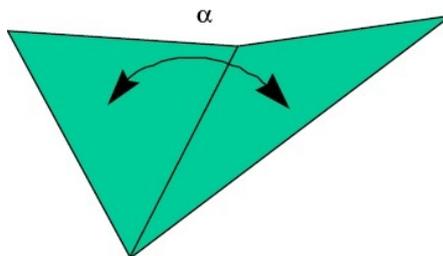


FIGURE 3.11 – Deux triangles non coplanaires [12]

Le critère de subdivision doit être en rapport avec l'aire des triangles, plutôt qu'avec la longueur de l'arête, car c'est l'importance des surfaces qui est visible

sur un maillage trop grossier. Dans la méthode de subdivision choisie, une surface correspondant au niveau  $n+1$  est quatre fois moins grande qu'une surface de niveau  $n$ .

#### 3.3.2.2 Méthode de subdivision

La plupart des méthodes de subdivision existantes tendent à modifier l'aspect de la surface originale au fil des subdivisions. Pour cela P. Burgy [12] a choisi le schéma polyédral parce qu'il conserve la forme originale du triangle subdivisé. Le choix du maillage initial a une grande importance, car la structure des triangles et leur homogénéité peuvent avoir une certaine influence sur la qualité de la simulation.

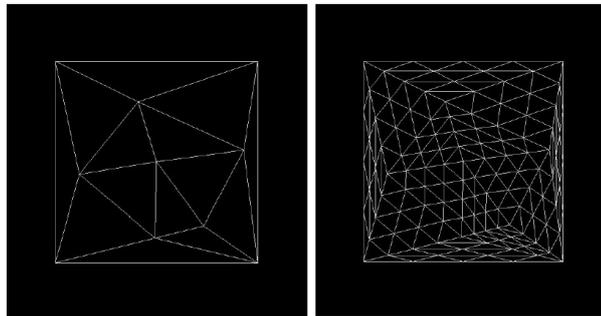


FIGURE 3.12 – Un exemple de maillage triangulé quelconque (à gauche), après deux subdivisions (à droite) [12]

### 3.3.3 Implémentation d'une méthode d'intégration de la multi-résolution dans un système masse-ressort : application à l'animation de tissu [3]

Dans le travail P. Burgy [12] le basculement entre les niveaux de détails se fait dans un seul sens, le système masse ressort devient donc statique après quelques pas de temps : c'est à dire, le maillage devient tous identiques provoquant ainsi la perte de la notion de multi-résolution. Afin de résoudre ce problème, Benameur [3] a intégré la multi-résolution dans un système masse-ressort pour l'animation de tissu. Ils ont utilisé un maillage triangulaire tout en essayant de faire un basculement entre les niveaux de détails dans les deux sens.

#### 3.3.3.1 Niveaux hiérarchiques

Au cours de la simulation, le maillage peut être représenté par plusieurs niveaux de subdivision hiérarchiques. Dans ce travail, les auteurs ont utilisé trois niveaux de subdivision. Le maillage initial représente le premier niveau de la hiérarchie ensuite chaque triangle peut être subdivisé en quatre triangles dont chacun d'eux peut être à son tour subdivisé en quatre sous triangles. De cette manière, ils ont pu obtenir deux autres niveaux hiérarchiques. La figure 3.13 montre la hiérarchie de subdivision d'un triangle.

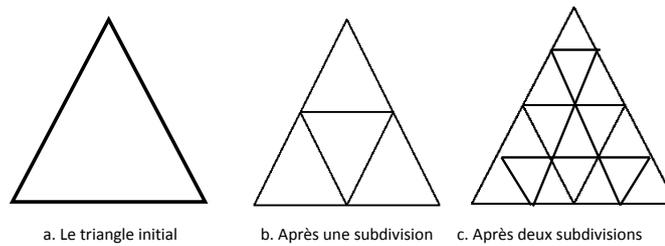


FIGURE 3.13 – La hiérarchie d’un triangle subdivisé selon le schéma polyédral [3]

### 3.3.3.2 Annulation d’une subdivision

Lors de l’implémentation du modèle, les auteurs ont constaté qu’après quelques pas de temps le maillage devient statique, il devient raffiné et interchangeable. Dans ce cas, la multi-résolution n’a pas de sens. La méthode consiste à annuler la subdivision dans les zones suffisamment plates. Il faut donc détecter les zones plates en calculant les angles entre les normales des triangles subdivisés. Si les triangles dans une zone raffinée sont suffisamment plats il faut faire un retour local au pas précédent : c’est à dire les masses faisant partie à cette zone sont remises à l’état précédent. Ensuite, la subdivision est annulée puis les positions et les vitesses des masses restantes dans cette zone sont recalculées.

L’annulation d’une subdivision est très compliquée, car il faut toujours garder la forme originale du maillage. Donc il faut prendre le sens inverse de la subdivision polyédral c’est-à-dire si deux triangles sont déjà subdivisés selon le schéma polyédral, il faut enlever les nouveaux points et les nouvelles arêtes qui sont rajoutées durant la subdivision pour obtenir les deux triangles initiaux (figure 3.14). De cette manière, les auteurs ont pu basculer entre les niveaux de détails et optimiser le rendu.

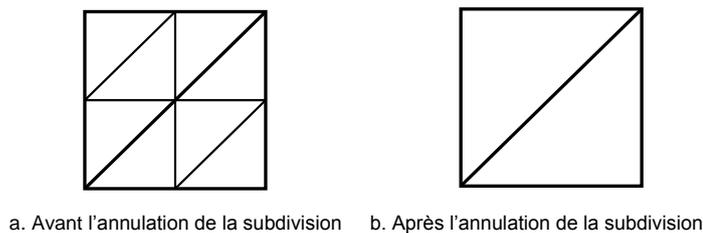


FIGURE 3.14 – Annulation de la subdivision dans une zone plate [3]

### 3.3.4 Cloth Animation with Adaptively Refined Meshes [51]

Dans leur travail, L. Li et V. Volkov ont présenté une méthode pour l’adaptation dynamique de maillages triangulaires appropriés à la simulation de tissu. Une approche ascendante est adoptée pour le raffinement de maillage, qui n’exige pas le pré-calcul et le stockage de la hiérarchie de la multi-résolution. La hiérarchie

est construite au cours d'exécution et permet la simplification locale de maillage en faisant un retour en arrière. Le raffinement et la simplification locale de maillage sont déclenchés par le critère de la courbure induite, où la courbure est estimée en utilisant des méthodes de géométrie différentielle discrète. Les résultats présentés dans ce travail sont l'animation réaliste du vêtement portée par un mannequin qui se déplace. Ils ont proposé une approche pour améliorer l'efficacité du système de simulation de tissu sans dégrader le réalisme de simulation.



FIGURE 3.15 – La courbure (comme représentée par différentes couleurs à (b)) change notamment à travers un vêtement [51]

#### 3.3.4.1 Maillage adaptatif

Dans le but d'assurer un basculement entre les différents niveaux de détails, l'historique de raffinement est maintenu. Il est stocké d'une façon hiérarchique afin de maintenir l'ordre des résolutions. Dans cette méthode, toutes les opérations locales de raffinement et de simplification affectent d'abord la hiérarchie, puis la hiérarchie est convertie en un maillage triangulaire conforme. La mise à jour de la hiérarchie est temporellement cohérente, c.-à-d. un petit changement de forme géométrique du tissu ne nécessite que quelques opérations d'ajustement de la hiérarchie. L'exportation de la hiérarchie à un maillage conforme n'est pas temporellement cohérente, mais simple et peu coûteuse en temps de calcul.

#### 3.3.4.2 Règle de raffinement $\sqrt{3}$

La règle de subdivision est une procédure pour la reconstruction d'un niveau de résolution  $M_{i+1}$  à partir de  $M_i$ . Dans la règle de raffinement  $\sqrt{3}$ , de nouveaux sommets sont insérés dans les centres de la face. Les centres de face de deux triangles voisins et un de leurs sommets communs produisent un triangle de résolution plus élevé. Les triangles incidents au sommet fils du triangle  $T \in M_i$  sont considérés comme des fils de  $T$ , comme dans la figure 3.16.

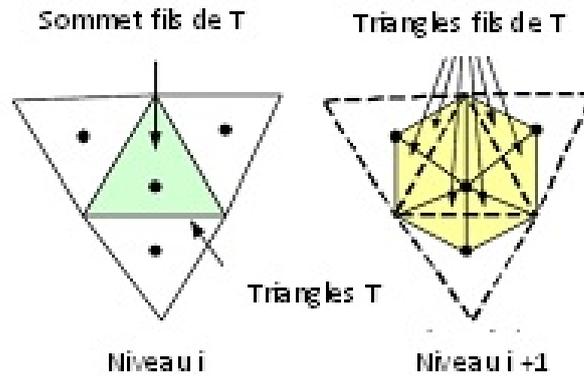


FIGURE 3.16 – Construction d’une résolution plus fine avec la règle de raffinement  $\sqrt{3}$  [51]

### 3.3.4.3 Critère de raffinement et de simplification

Le critère de raffinement est l’estimation d’une approximation d’une erreur locale en utilisant la courbure. Cette dernière est calculée par une méthode géométrique différentielle discrète. Si le critère indique que le triangle doit être subdivisé (le critère est positif), tous ses fils doivent être créés. Dans le cas où le critère devient négatif, les nouveaux triangles doivent être retirés. Il est possible que quelques fils qui vont être retirés aient à leurs tours des fils, dans ce cas la simplification sera abandonnée.

### 3.3.5 Adaptive meshing for cloth animation [82]

J. Villard et H. Borouchaki ont proposé une nouvelle méthode d’animation de tissu basée sur un système masse-ressort. Les surfaces du tissu sont initialement discrétisées en utilisant un maillage rectangulaire. Afin d’avoir une représentation précise de la surface, spécialement les plis, le maillage initial est raffiné.

#### 3.3.5.1 Maillage adaptatif

La première étape consiste à définir la surface du tissu par un maillage rectangulaire régulier avec une résolution grossière. Quand on laisse une pièce de tissu tomber sur un objet ou sur terre, le maillage correspondant doit s’adapter à sa forme géométrique, ceci a permis les auteurs d’avoir une représentation plus précise durant le processus de simulation. Le schéma adaptatif consiste à raffiner le maillage localement quand la courbure excède un seuil donné.

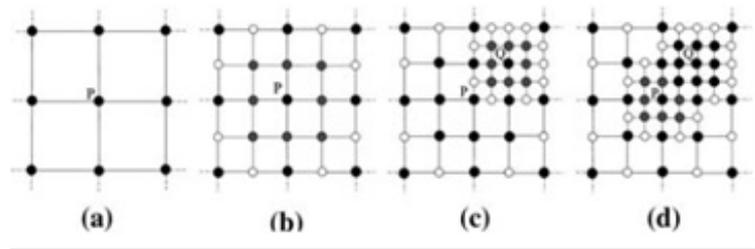


FIGURE 3.17 – Raffinement de maillage dans 3 étapes

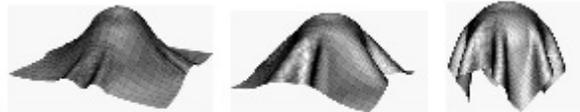


FIGURE 3.18 – Une pièce de tissu sur une balle

### 3.3.5.2 Critère de raffinement

Le critère de raffinement est basé essentiellement sur les propriétés géométriques actuelles du tissu. L'étape de raffinement est appliquée sur un sommet si la courbure locale de la surface excède un seuil donné. Afin d'éviter les calculs complexes, les auteurs ont approximé la courbure locale par une déviation entre la surface et le plan tangent. La déviation est calculée à partir d'une estimation de la normale de la surface à chaque sommet. La normale à un sommet P peut être approximée par la moyenne des normales des huit triangles qui partagent le sommet P.

### 3.3.6 Fast Virtual Cloth Energy Minimization [48]

T. Le Thanh et A. Gagalowicz ont présenté dans [48] une nouvelle méthode efficace pour la simulation de vêtements. Leur nouvelle technique de simulation est caractérisée par la conception d'une préposition automatique puissante de vêtement autour d'un mannequin. Dans ce travail les auteurs ont essayé d'optimiser leur modèle ayant l'obtenu dans [47] et ceci afin de réduire le temps de calcul. L'idée dans ce travail était de discrétiser premièrement le vêtement en différentes résolutions (de la résolution la plus grossière à la plus fine). Une fois que la résolution grossière de système est minimisée dans un temps très court, la résolution la plus fine est reconstruite est minimisé en fonction de la résolution précédente. Finalement, la résolution la plus fine est minimisée avec un temps raisonnable

#### 3.3.6.1 Minimisation d'énergie

Les vêtements sont représentés par un système masse-ressort avec un maillage triangulaire ou rectangulaire, l'énergie de vêtement est estimée en calculant la moyenne d'élongation de tous les ressorts, les auteurs calculent l'énergie du vêtement en fonction de l'énergie de traction, de cisaillement, de flexion et de gravité, puis ils déterminent la forme de vêtement en déplaçant les masses du système pour obtenir le minimum d'énergie.

### 3.3.6.2 La représentation multi-résolution

Les auteurs ont développé une nouvelle méthode de décomposition qui peut être travaillée indépendamment de la structure de maillage. L'idée principale consiste à prédéfinir le patron de vêtement à différentes résolutions. Ensuite, ils déterminent le correspondant de chaque particule dans une résolution donnée avec une autre particule dans une autre résolution.

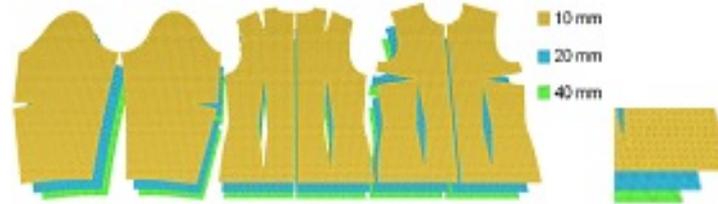


FIGURE 3.19 – Représentation multi-résolution d'une chemise

### 3.3.7 Towards Efficiency in Cloth Simulation [6]

F. Birra et M. Santos dans [6] ont présenté une technique qui permet de simuler des pièces de tissus avec des niveaux de détails adaptatifs et ceci sans dégrader les propriétés physiques de la surface ni la stabilité de la simulation. L'opération principale appliquée sur le maillage est dérivée des surfaces de subdivision, mais les règles de subdivision sont adaptées afin de prévenir la simulation numérique de la divergence.

#### 3.3.7.1 Subdivision adaptative 4-8

Ce schéma opère sur un maillage appelé (4-k meshes ou tri-quad meshes), puisqu'il peut être décrit comme un maillage triangulaire groupé en paire formant des carrés. La seule restriction est que chaque triangle doit se placer dans un carré. L'arrête commune entre les triangles groupés est l'arrête intérieure du bloc ou le diagonal. Dans les frontières, il se peut d'avoir des blocs incomplets, puisqu'un des triangles peut être manqué. L'opération de raffinement élémentaire consiste à diviser l'arête intérieure. L'arrête commune est divisé en deux en plaçant un sommet au milieu ensuite elle sera connectée avec le sommet opposé du bloc adjacent.



FIGURE 3.20 – Subdivision adaptative 4-8

Bien que, le maillage 4-k (4-k meshes), n'est pas en général un maillage triangulaire, il faut convertir le maillage triangulaire irrégulier en un maillage trian-

gulaire régulier, pour résoudre ce problème les auteurs ont proposé une méthode alternative basée sur le principe de subdivision  $\sqrt{3}$  ( $\sqrt{3}$  – *subdivision*). Dans une première étape, ils divisent chaque triangle dans le maillage original en ajoutant un sommet dans le centre de la face et le connecté avec les sommets originaux. Ensuite, ils regroupent les nouveaux triangles qui partagent les arêtes du maillage original en blocs de deux triangles. Finalement, ils procèdent à l'étape d'échange d'arêtes. Le maillage résultat sera plus régulier avec un respect de la taille de triangle.

#### 3.3.7.2 Raffinement et simplification

Dans chaque étape de simulation, les auteurs examinent chaque arête commune et calculent un estimateur d'erreur. Ce dernier leur permet de savoir quand il faut subdiviser ou simplifier le maillage. Si la valeur d'erreur est trop grande, ils subdivisent le maillage, sinon ils le simplifient. Dans tous les cas, chaque bloc peut être subdivisé en un seul niveau dans chaque pas de temps. La simplification procède en fonction de la priorité, en commençant par les parties les plus plats

#### 3.3.8 Efficient cloth simulation using an adaptive finite element method [4]

J. Bender et al ont présenté dans [4] une méthode efficace de simulation adaptative de tissu basée sur le schéma de subdivision  $\sqrt{3}$ . Leur modèle adaptatif de tissu a pu traiter un maillage triangulaire irrégulier et n'est pas limité aux maillages réguliers qui sont exigés dans différents travaux. Les auteurs ont proposé un modèle adaptatif de tissu basé sur la mécanique des milieux continus. Ils ont utilisé la méthode des éléments finis linéaire (FEM) en combinaison avec une formulation co-rotationnelle pour avoir une simulation efficace. La méthode travaille sur des éléments triangulaires qui sont définis par le maillage triangulaire adaptatif de leur modèle de tissu. La résolution du maillage est changée durant la simulation en utilisant le schéma de subdivision  $\sqrt{3}$ . Ce schéma définit comment un maillage triangulaire peut être raffiné de manière adaptative tout en préservant la qualité de simulation.

##### 3.3.8.1 Critère de raffinement

Le critère de raffinement dans ce travail est basé sur la courbure moyenne au niveau des sommets du maillage. Les auteurs prennent le maximum de la courbure des trois sommets d'un triangle pour décider d'affiner le triangle. L'utilisation du maximum permet une adaptation rapide si la courbure du maillage augmente localement. Dans le cas de simplification, il ne suffit pas de considérer uniquement la courbure au niveau des sommets d'un triangle. Dans ce cas, les auteurs comparent la courbure maximale du voisinage d'un anneau du point central qui est retiré au cours de la jointure.

### 3.3.9 Fast and stable cloth simulation based on multi-resolution shape matching [5]

J. Bender et al [5] ont présenté une méthode efficace et inconditionnellement stable qui permet la déformation des modèles très complexes de tissu raides en temps réel. La méthode proposée est basée sur une approche de correspondance de forme qui utilise des arrêtes et des triangles comme des régions à une dimension (1D) et à deux dimensions (2D) pour simuler la résistance d'étirement et de cisaillement.

Généralement, les approches de correspondance de forme subdivisent les particules d'un modèle en plusieurs régions qui se chevauchent. Pour chaque région, la configuration initiale du modèle est adaptée à l'état déformé courant afin de définir les nouvelles positions. Ensuite, les particules sont attirées vers cette nouvelle configuration pour simuler l'élasticité. La raideur globale du modèle dépend de la taille de la région. La simulation de tissu nécessite une grande rigidité d'étirement et de cisaillement tandis que la résistance de flexion est faible. Le problème est que les approches basées sur les régions ne peuvent pas différencier entre l'étirement, le cisaillement et la flexion. En outre, le temps de calcul pour la simulation d'un maillage quelconque dépend non seulement de la taille du maillage, mais aussi de la taille de la région.

Au lieu d'utiliser de grandes régions, les auteurs ont introduit une approche de correspondance de forme multi-résolution pour augmenter seulement la rigidité d'étirement et de cisaillement. La correspondance de forme est effectuée pour chaque niveau du modèle multi-résolution et les résultats se propagent d'un niveau à l'autre. Afin de préserver les plis fins du tissu sur les niveaux grossiers de la hiérarchie, les auteurs ont présenté une version modifiée de la méthode de correspondance de forme originale. Ils ont montré aussi que leur méthode peut être exécutée efficacement dans les GPU.

### 3.3.10 Multiresolution cloth based on animation instances [74]

Dans cet article, Shi et al. [74] ont proposé une nouvelle méthode pour animer des maillages multi-résolution basés sur des instances d'animation de tissu. Tout d'abord, un type spécifique d'animation de tissu à haute résolution est choisi comme instance, à partir de laquelle la tendance à la déformation est analysée et les modes de déformation sont extraits. Deuxièmement, le modèle de la résolution la moins détaillée correspondant est affiné en fonction des modes de déformation extraits à l'aide de la stratégie de raffinement. Enfin, la force est analysée et le système dynamique est conçu pour le modèle multi-résolution. Les expériences ont montré que non seulement les détails fins sont maintenus, mais aussi l'efficacité de calcul est améliorée.

## 3.4 Récapitulatif

La table suivante résume le principe des principaux travaux ayant exploités la multi-résolution :

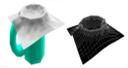
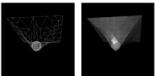
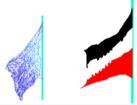
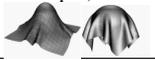
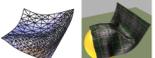
Travail de	Résultats obtenus	Schéma de subdivision	Critère de subdivision	Critère d'annulation de subdivision
D. Hutchinson [38]	Animation de pièces de tissu 	Les quatre carrés qui entourent le point considéré sont remplacés par 16 nouveaux carrés	Si l'angle entre deux arêtes contigües (et opposées) excède un angle critique	Pas d'annulation de subdivision
P. Burgy [12]	Déformation de tissu 	Schéma polyhédral	Si l'angle entre deux triangles ayant une arête commune excède un angle critique	Pas d'annulation de subdivision
S. Benameur [3]	animation de différentes pièces de tissu 	Schéma polyhédral	Si l'angle entre deux triangles ayant une arête commune excède un angle critique	Si les triangles dans une zone raffinée sont suffisamment plats
L. Li [51]	animation réaliste du vêtement portée par un mannequin qui marche. 	Règle de raffinement $\sqrt{3}$	L'erreur locale calculée en fonction de la courbure est positive	L'erreur locale est négative
J. Villard [82]	Animation de tissu (avec génération de plis) 	Chaque rectangle est subdivisé en quatre rectangles	La courbure locale de la surface excède un seuil donné	Pas d'annulation de subdivision
T. Le Thanh [48]	préposition automatique de vêtement autour d'un mannequin 	Pas de subdivision puisque les différentes résolutions sont prédéfinies à l'avance et un basculement entre eux est fait durant la simulation	//	//
F. Birra [6]	Animation de pièces de tissus carrés suspendus 	Subdivision adaptative 4-8	Si l'estimateur d'erreur est trop grand	Si la valeur d'erreur est petite
J. Bender [4]	Animation de pièces de tissus 	schéma de subdivision $\sqrt{3}$	Basé sur la courbure moyenne, Prendre le maximum de la courbure des trois sommets de chaque triangle pour décider de faire le raffinement ou non	//
J. Bender [5]	Animation de tissu avec une approche basée sur la correspondance de forme multirésolution 	//	//	//

TABLE 3.1 – Quelques travaux exploitant la multi-résolution

## 3.5 Conclusion

À travers cette étude, nous avons essayé d'expliquer le principe d'exploitation de la multi-résolution dans la simulation de tissus et de vêtements, pour ce faire nous avons présenté quelques travaux dans ce domaine tout en présentant les méthodes et les critères de subdivision implémentés dans ces travaux.

Nous avons remarqué que tous ces travaux ont utilisé des modèles physiques, dont chacun a choisi une méthode d'intégration que ce soit implicite ou explicite pour résoudre le système d'équations du modèle. La présentation des différents schémas de subdivision utilisés dans ces travaux nous a permis de constater que le choix de la forme de maillage, de la méthode de subdivision et de critère de subdivision et de simplification dépend de la forme de tissu ou de vêtement qu'on souhaite simuler ainsi que du résultat qu'on veut obtenir.

Tous ces travaux ont exploité la multi-résolution afin de réduire le temps de calcul, puisque la présentation de tissu ou de vêtement nécessite un grand nombre de triangle ou de rectangle et la manipulation d'un maillage trop raffiné est coûteuse. Dans le même cadre d'idée, nous allons exploiter la multi-résolution dans la simulation de vêtement. Mais avant d'effectuer cette étape, il faut choisir un modèle de simulation. Nous avons donc décidé de faire une combinaison entre un modèle basé sur la mécanique des milieux continus et un système de particules. Le prochain chapitre sera consacré à la simulation de vêtements par modèle physique.

# Simulation de vêtements par modèle physique

## Sommaire

---

4.1	Introduction . . . . .	44
4.2	Généralité sur la simulation des vêtements . . . . .	46
4.2.1	La dynamique . . . . .	46
4.2.2	Propriétés physiques des tissus . . . . .	47
4.2.3	La simulation mécanique et son application aux tissus . . . . .	47
4.2.4	Le modèle . . . . .	48
4.3	La simulation de tissu et de vêtement par un modèle physique . . . . .	52
4.3.1	Choix de la méthode d'intégration . . . . .	55
4.4	Correction des positions . . . . .	56
4.5	La gestion de collision . . . . .	57
4.6	Résultats expérimentaux . . . . .	58
4.6.1	Etude comparative . . . . .	63
4.6.2	Discussion des résultats . . . . .	64
4.7	Conclusion . . . . .	64

---

## 4.1 Introduction

**L**A simulation de tissu était basée dans la majorité des travaux ([56, 17]) sur les systèmes masses-ressorts. Ces modèles représentent le comportement du tissu par des forces liant des masses représentant la surface du tissu à la distance les séparant de leurs voisins. Ils sont devenus populaires grâce à la simplicité de leur formulation, qui facilite notamment l'usage des méthodes d'intégration numérique implicites [26, 60, 18]. Malheureusement, les systèmes masses-ressorts sont incapables de modéliser avec précision l'élasticité d'une surface, et ils restent particulièrement imprécis pour des modèles anisotropes et non linéaires comme le tissu.

Récemment, les éléments finis du premier ordre ont été introduits pour obtenir un bon compromis entre précision et vitesse de calcul. Ils ont été exprimés comme des systèmes de particules. Cependant, des adaptations sont nécessaires pour pouvoir gérer correctement le contexte de grandes déformations propre à la simulation des tissus. Une nouvelle approche co-rotationnelle a été proposée et est devenue très répandue, car elle combine la simplicité des calculs en utilisant le tenseur linéaire de Cauchy avec de grandes déformations. Cette méthode a été utilisée avec succès par Etmuss et al. [30] pour simuler des tissus. Elle est essentiellement adaptée pour simuler les matières parfaitement linéaires isotropiques avec de fortes déformations. Le processus de calcul est donc compliqué par l'ajout de transformations supplémentaires, telles que ces formulations co-rotationnelles.

D'autres méthodes [86] permettent de s'affranchir de ces rotations en utilisant explicitement le calcul du cisaillement, mais malheureusement, ces approximations restent toujours imprécises. Dans le contexte de simulations de grande précision, un modèle de courbure est ajouté en utilisant les schémas définis par [87].

Dans un travail récent, Volino et al. [88] ont présenté un modèle simple et précis même avec de grandes déformations sans avoir besoin de transformation additionnelle comme les formules co-rotationnelles. Ce modèle peut être exprimé comme un système de particules classique (dont les forces des particules sont directement calculées à partir de leurs positions). Ils ont pu obtenir une simulation stable et efficace en utilisant des méthodes d'intégration implicite (Inverse Euler, BDF-2, etc.) en proposant une méthode efficace de calcul du Jacobien. Ils ont mentionné qu'il est possible d'utiliser leur modèle avec l'une des méthodes d'intégration explicite, mais pour assurer la stabilité du modèle de simulation de tissu avec ces méthodes d'intégration il faut utiliser des pas de temps suffisamment petits. Malgré que les méthodes d'intégration implicite assurent la stabilité du modèle, mais elle nécessite des calculs additionnels.

Dans ce travail, nous avons utilisé le modèle basé sur la mécanique des milieux continus de Volino et al. [88] pour la simulation de tissu. Nous avons modélisé le tissu du vêtement par un maillage triangulaire irrégulier en utilisant la méthode des éléments finis du premier ordre pour résoudre l'équation du mouvement. Nous avons essayé de rendre le cadre plus réaliste en ajoutant des forces externes telles que le vent, la gravité et le frottement.

Notre contribution concerne donc la résolution du problème de la divergence du modèle au cours de la simulation, nous avons commencé par l'utilisation des méthodes d'intégration explicite (Méthode d'Euler et méthode d'Euler modifiée) du fait de leur simplicité d'implémentation. Ces méthodes n'ont pas pu nous donner des résultats sauf dans le cas où on corrige les positions des particules avec la méthode de correction de positions que nous avons proposée. Nous avons donc limité le déplacement de chaque particule à chaque itération, de telle sorte que chaque particule ne peut pas se déplacer plus qu'une certaine distance (seuil), les tests expérimentaux nous ont permis de déterminer la valeur du seuil (voir la section 4.4).

Vu que les méthodes implicites offrent plus de stabilité au système, nous avons essayé d'implémenter la méthode d'Euler implicite. Et afin d'éviter les calculs additionnels tels que la résolution d'un grand système linéaire ou l'utilisation du Jacobien, nous avons proposé une méthode d'exploitation de la méthode d'intégration implicite, elle consiste à calculer dans un premier temps les forces de toutes

les particules ensuite faire le calcul des vitesses et positions des particules. En respectant cet ordre de calcul nous pouvons calculer la vitesse de chaque particule en fonction de sa force au temps  $t + h$  et non pas au temps  $t$ , ce qui est le principe des méthodes implicites.

Dans ce chapitre, nous allons détailler notre modèle. Nous allons tout d'abord donner des généralités sur la simulation de vêtements dans lesquels les notions fondamentales nécessaires à la compréhension de notre modèle sont expliquées. Nous détaillerons par la suite notre modèle de simulation de tissu et de vêtements, tout en présentant la méthode de correction de position que nous avons proposée ainsi que la méthode de gestion de collision que nous avons choisie. Les résultats obtenus avec une discussion sont illustrés dans une dernière partie.

## 4.2 Généralité sur la simulation des vêtements

### 4.2.1 La dynamique

La partie de la mécanique qui étudie comment les objets sont évolués et se déplacés dans le temps sous l'influence des forces et des contraintes est appelée dynamique. En cinématique, qui est l'étude mathématique du mouvement, trois quantités essentielles sont considérées [85] :

- La position : généralement représentée par un vecteur dans l'espace à trois dimensions.
- La vitesse : la dérivée du premier ordre de la position par rapport au temps.
- L'accélération : la dérivée du second ordre de la position par rapport au temps.

La dynamique nécessite de prendre en considération la masse ainsi que les quantités reliant la masse et le mouvement de l'objet :

- La force qui génère une accélération sur l'objet.
- L'énergie à partir de laquelle les forces sont dérivées.

La loi fondamentale de la dynamique, appelée aussi la deuxième loi de Newton, est l'égalité entre la force et l'accélération multipliée par la masse. Elle est formulée comme suite :

$$F(t) = m d^2x/dt^2 \quad (4.1)$$

Où :  $x$  est la position d'une masse ponctuelle ( $m$ ) et  $F$  est la somme des forces (externes et internes) appliquées à cette masse. La loi de Newton est applicable aussi bien dans les modèles discrets que dans les modèles continus. Quel que soit le modèle mécanique représentant le tissu, son évolution est gouvernée par cette loi. La déformation de l'objet est gouvernée aussi par des lois additionnelles, elle dépend des propriétés du matériel de l'objet lui-même, par exemple l'élasticité, la viscosité et la plasticité. La forme de cette loi comportementale et les valeurs de ses paramètres sont obtenues principalement par des expériences. La loi de Newton et la loi comportementale forment un modèle mécanique complet pour la simulation des systèmes [85].

### 4.2.2 Propriétés physiques des tissus

Les propriétés mécaniques des tissus doivent être prises en compte à partir du moment où elles réagissent à des stimuli tels que des déformations imposées, des contraintes ou des modèles de forces. De manière plus générale, ces propriétés sont exprimées par des relations liant les contraintes (les forces internes) aux déformations dans le matériau. Des procédures expérimentales, principalement basées sur des tests de contraintes et de déformations, peuvent être utilisées afin d'évaluer le comportement mécanique des tissus, ces derniers devant être exprimés selon le formalisme lié à la physique et à la mécanique. Étant donné que les tissus subissent souvent de grandes déformations, leur comportement est généralement fortement non-linéaire : les forces internes ne créent pas beaucoup de déformations tant qu'elles restent faibles, mais la rigidité augmente rapidement dès que les déformations deviennent plus élevées. De ce fait, il n'y a pas proportionnalité entre les contraintes et les déformations. De ce comportement non linéaire résulte la déformabilité de ces tissus : ils peuvent aussi bien se déplacer librement et d'une manière harmonieuse tant qu'il n'y a pas de contraintes, mais aussi maintenir leur forme dans des situations extrêmes, comme dans le cas d'un tissu tendu. Alors que des approximations linéaires sont souvent utilisées pour simplifier les calculs, une simulation plus précise utilisant des modèles non linéaires permet de simuler plus fidèlement les tissus [13].

### 4.2.3 La simulation mécanique et son application aux tissus

La simulation mécanique tente de reproduire des surfaces virtuelles représentant un tissu à partir de paramètres donnés intervenant dans des relations de type " contrainte-déformation ". Celles-ci peuvent typiquement être décrites comme des courbes, selon divers degrés de simplification et d'approximation. Alors que les modèles linéaires simples peuvent approximer ces courbes, des modèles plus précis peuvent les reproduire avec des fonctions analytiques non linéaires.

Le vêtement doit également réagir à son environnement. Ces interactions regroupent non seulement les collisions avec des objets de l'environnement s'exprimant par une réaction et de la friction (pour les vêtements virtuels, il s'agit du corps qui les porte), mais aussi l'auto-collision entre différentes parties du vêtement lui-même. La gravité est aussi un élément qui doit être pris en considération, car elle exerce une force proportionnelle à la masse de l'objet, et donc une accélération constante qui tire les vêtements vers le sol. Des modèles plus sophistiqués peuvent également prendre en compte les forces aérodynamiques, qui dans une implémentation simple sont réduites à des forces de viscosité liées à la différence de vitesse entre le tissu et l'air environnant (vitesse du vent) [55].

Quel que soit le type de modélisation choisi pour représenter le comportement d'un tissu, des équations supplémentaires sont nécessaires pour exprimer les lois fondamentales de la mécanique. Pour cela, plusieurs types de contextes doivent être pris en considération pour la simulation de vêtements [13]. Parmi eux se trouvent :

- la problématique liée au drapé - où la forme au repos du drapé d'un vêtement doit être calculée sur un corps statique ;

- la problématique liée à l'animation - où l'animation précise du vêtement doit être calculée sur un corps en mouvement.

La problématique du drapé n'a besoin que d'un calcul numérique pour trouver le meilleur équilibre possible entre les différentes équations en utilisant uniquement les lois de l'élasticité. La problématique de l'animation exige, elle, de calculer avec précision l'évolution de l'état mécanique au cours du temps, et nécessite la simulation de comportements mécaniques dissipatifs tels que la viscosité et la plasticité. Alors qu'un solveur quasi statique, ne considérant pas la vitesse, peut être suffisant pour traiter la modélisation d'un drapé, un solveur dynamique, prenant en compte la vitesse et l'inertie, est nécessaire pour réaliser l'animation d'un vêtement.

### 4.2.4 Le modèle

Que ce soit dans le contexte quasi statique ou dynamique, la simulation du vêtement peut s'effectuer soit en utilisant une représentation précise dérivant d'un formalisme continu tel que les éléments finis (maillages en triangles), ou alors de manière plus simplifiée par des systèmes de particules qui modélisent la surface du tissu par un ensemble de masses discrètes en interaction.

#### 4.2.4.1 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (Finite Element Method (FEM)) est une méthode d'analyse numérique pour la recherche de solutions approchées d'équations d'évolution. Les équations d'évolution englobent à la fois les équations différentielles ordinaires (EDO) ainsi que les équations aux dérivées partielles (EDP) [63]. La méthode des éléments finis calcule les énergies mécaniques au sein d'une discrétisation prédéfinie. C'est une méthode dans laquelle les fonctions sont remplacées par une approximation par morceaux (élément). A chaque nœud du maillage, un certain nombre de degrés de liberté est considéré (déplacement, rotation). De plus, le nombre de nœuds par élément et le polynôme des fonctions de la forme varient (bilinéaire, trilineaire, quadrilinéaire, etc.). Après le calcul de chaque élément séparément, les contributions de tous les éléments de la surface sont successivement assemblées et résolues [85]. La méthode des éléments finis est la solution préférée dans l'analyse numérique et dans les applications de l'ingénierie parce qu'elle est polyvalente.

En ce qui concerne la simulation de vêtement, il est possible de simuler avec précision tous les aspects. Cependant, par rapport au domaine de l'ingénierie, le facteur de temps est crucial, il faut avoir des processus rapides dans l'industrie de vêtement, mais le temps de calcul en utilisant la méthode des éléments finis est trop grand. Par conséquent, certaines approches supposent un comportement mécanique simplifié (linéaire, des matériaux isotropes) et limitent les applications à des vêtements simples, ce qui rend ces systèmes moins précis.

#### 4.2.4.2 Les systèmes de particules

Le but est de définir un modèle pour représenter les propriétés mécaniques de tissu sur des surfaces géométriques qui le représentent. Ces surfaces sont typiquement représentées par des maillages polygonaux, étant triangulaires ou quadran-

gulaires, régulières ou irrégulières. Les modèles continus sont considérés comme les schémas les plus précis pour la représentation de tissu. De tels schémas sont cependant lents et ne sont pas suffisamment souples pour traiter correctement de grandes déformations et des contraintes géométriques complexes (comme les collisions). Les méthodes des éléments finis expriment les équations mécaniques en fonction de l'état de la déformation de la surface à l'intérieur des éléments bien définis (généralement des triangles ou des rectangles). Leur résolution implique aussi des calculs supplémentaires. Une autre possibilité consiste à construire un modèle basé sur l'interaction des points voisins de la surface. Les systèmes de particules permettent la mise en œuvre de modèles simples et flexibles adaptés pour le calcul efficace des objets fortement déformables tels que le tissu [86].

### 4.2.4.3 Les systèmes masse-ressort

Le système de particules le plus simple qu'on peut penser est le système masse-ressort. Dans ce schéma, les seules interactions sont les forces exercées entre les couples de particules voisines, de même que si elles étaient attachées par des ressorts (décrites par une loi de force / allongement le long de sa direction, qui est en fait un coefficient de rigidité et une longueur de repos dans le cas des ressorts linéaires). Les systèmes masse-ressort sont des méthodes très populaires, car ils permettent une implémentation simple et une simulation rapide des tissus.

L'approche la plus simple consiste à construire des ressorts le long des arrêtes du maillage triangulaire, qui décrit la surface. Cela conduit toutefois à un modèle imprécis qui ne peut pas modéliser ni le comportement contrainte-déformation anisotrope du matériau de tissu, ni la flexion. Des modèles plus précis sont construits sur des grilles de particules carrées régulières décrivant la surface. Alors que la rigidité d'allongement est modélisée par des ressorts le long des arrêtes de la grille (ressorts de structure), la rigidité de cisaillement est modélisée par des ressorts diagonaux (ressorts de cisaillement) et la rigidité de flexion est modélisée par des sauts ressort le long des arrêtes (ressorts de flexion). Ce modèle est aussi imprécis en raison des dépendances inévitables entre les différents modes de déformation des ressorts. Il est également inapproprié pour les modèles élastiques non linéaires et de grandes déformations. Des variations plus précises du modèle considèrent des ressorts angulaires plutôt que des ressorts droits pour représenter la rigidité de cisaillement et de flexion, mais la simplicité du système ressort-masse originale est alors perdue [86].

### 4.2.4.4 Un système de particule précis

Les systèmes masses-ressorts sont insuffisants de représenter avec précision le comportement anisotrope non linéaire de tissu. Récemment, les systèmes de particules ont montré [88] leur efficacité pour la modélisation de tels objets. Ces systèmes sont basés sur des représentations continues simplifiées, tel que les éléments finis du premier ordre, ils considèrent les forces d'interaction simultanée entre les trois particules qui sont les sommets de chaque triangle du maillage. La condensation des masses (mass lumping) permet aux éléments finis du premier ordre de pouvoir être exprimés comme des systèmes de particules, et d'utiliser toutes les techniques d'intégration numérique développées dans ce contexte.

#### 4.2.4.5 Méthode d'intégration

De la formulation du modèle mécanique du système, il résulte un système d'équations différentielles régissant l'évolution de la géométrie en fonction du temps. Il peut être intégré par des méthodes d'intégration explicites ou implicites.

Les méthodes d'intégration explicites sont les méthodes les plus simples pour la résolution des systèmes différentiels ordinaires du premier ordre. Elles considèrent la prédiction du futur état du système directement à partir de la valeur des dérivés. Elles sont très faciles à mettre en œuvre et plus rapide pour atteindre une précision donnée. Cela est particulièrement vrai pour les méthodes d'ordre élevé, qui offrent une très grande précision si le pas de temps est assez petit, mais elles divergent brusquement si le pas du temps dépasse un certain seuil. C'est la raison pour laquelle un système efficace de contrôle du pas de temps est essentiel pour la mise en œuvre de ces méthodes [86].

La méthode numérique la plus simple et la plus ancienne est la méthode d'Euler explicite. Elle calcul l'état suivant (vitesse  $v$  et position  $x$ ) du tissu au temps  $t + h$  (dont  $h$  est le pas du temps) en évaluant les forces au temps  $t$ . Formellement, la méthode d'Euler est décrite par les équations suivantes :

$$\begin{cases} v(t+h) = v(t) + h/mF(t) \\ x(t+h) = x(t) + h * v(t) \end{cases} \quad (4.2)$$

Une variante de la méthode d'Euler permet d'obtenir une plus grande stabilité. La seule modification à effectuer est que :

$$x(t+h) = x(t) + h * v(t) \quad (4.3)$$

devient

$$x(t+h) = x(t) + h * v(t+h) \quad (4.4)$$

L'astuce consiste simplement à utiliser la vitesse exprimée au temps  $t + h$  et non pas au temps  $t$ . En se basant sur ce schéma explicite, une famille de méthodes a été développée, la plus connue étant la méthode de Range-Kutta. Bien que les méthodes explicites d'Euler du premier ordre et de point milieu du second ordre doivent être limitées à des applications simples (du fait de leur simplicité), un choix populaire est la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 (du fait de leur stabilité) [63].

Dans les situations typiques de simulation de tissu, la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 a prouvé d'être supérieure à la méthode de point milieu du second ordre, qui lui-même est beaucoup plus efficace que la méthode d'Euler. Mais elle est plus couteuse en terme de temps de calcul que les méthodes de point milieu et d'Euler [55]. D'autres méthodes explicites plus précises existent également. Pour plus de détails sur les méthodes d'intégration le lecteur peut se référer aux [63, 95, 20, 55].

Afin de contourner le problème de l'instabilité, des méthodes d'intégration implicites sont utilisées. Elles sont utilisées pour la première fois dans le domaine de la simulation de tissu par [2]. La méthode de Backward Euler est l'implémentation de base des méthodes implicites. Contrairement aux méthodes d'intégration explicites, cette méthode utilise les forces au temps  $t + h$ . Elle effectue le calcul de l'état du système en utilisant la dérivée prédite pour le prochain pas du temps et non pas au pas du temps courant. Formellement, la méthode d'Euler implicite (Backward Euler) est décrite par les équations suivantes :

$$\begin{cases} v(t+h) = v(t) + h/mF(t+h) \\ x(t+h) = x(t) + h * v(t+h) \end{cases} \quad (4.5)$$

Outre la méthode d'Euler implicite, d'autres méthodes implicites d'ordre supérieur plus précises existent, telles que la méthode de point milieu inverse, qui est malgré de sa simplicité elle présente quelques problèmes d'instabilité. Une solution simple consiste à faire une interpolation entre les équations des méthodes d'Euler et de point milieu, tel que proposé dans [86]. D'autres travaux ont choisi différentes méthodes implicites, mais quelle que soit la variation choisie, la difficulté majeure dans l'utilisation de méthodes d'intégration implicites est qu'elles impliquent la résolution d'un grand système d'équations linéaires pour chaque itération. Ceci étant le problème essentiel des méthodes d'intégration implicites. Par conséquent, diverses approches ont été proposées pour résoudre ce problème [2, 26, 41, 86, 88]. De toute façon, dans le cadre de simulations non linéaires telles que le tissu, quand une bonne précision et une stabilité sont nécessaires, il faut faire recours au Jacobien correspondant à l'état actuel, Volino et al. [88] ont proposé une méthode de calcul simplifié du Jacobien.

### Critères du choix de la méthode d'intégration

Pour un problème donné, une méthode d'intégration adéquate devrait être choisie en tenant compte de [85] :

- La précision requise de la simulation qui peut limiter le pas du temps ;
- La précision requise pour un pas de temps donné ;
- Les problèmes de stabilité numérique qui peut également limiter le pas du temps ;
- La structure du problème permettant certaines tâches de calcul d'être simplifiées.

Vous obtenez ce que vous payez. Quelle que soit la technique que vous utilisez pour effectuer la simulation. Dans le cas des méthodes explicites, vous devez payer pour le calcul précis du mouvement de chaque particule. Cela peut prendre beaucoup de ressources informatiques. Mais le résultat sera très précis grâce à l'utilisation de méthodes d'intégration explicites d'ordre élevé. Avec les méthodes implicites, on paye moins pour un résultat plus approximatif (mais peut-être réaliste, comme on ne se soucie que du mouvement macroscopique et non de toutes les particules individuelles), ceci est obtenu par une évaluation de la position d'équilibre. Ainsi, l'exploitation de cette connaissance engendre un coût supplémentaire. La méthode d'intégration peut être choisie aussi en fonction de la nature de l'application [85] :

- \* **Système interactif temps réel** : Généralement, un tel système nécessite des pas de temps pour permettre un taux d'affichage d'image d'au moins cinq images par seconde. D'autre part, la précision quantitative des comportements dynamiques n'est pas nécessaire, le réalisme visuel étant suffisant. Un système de particules simples peut être choisi dans ces cas, en utilisant une méthode d'intégration rapide et approximative. Une méthode implicite peut être considérée si le système est assez simple à mettre en œuvre des simplifications qui permettront de réduire le temps de calcul de chaque itération pour permettre un taux correct d'affichage d'image. Ceci est généralement obtenu par l'utilisation de maillages réguliers et une interaction linéaire simple

entre les particules. Les méthodes explicites devraient être prises en considération lorsqu'ils traitent avec des modèles et des comportements complexes, ou lorsque des itérations très rapides sont nécessaires sur des maillages irréguliers.

- ★ **Systèmes de simulation visuelle offline** : De tels systèmes exécutent habituellement des calculs plus précis sur des modèles plus raffinés. La taille de maillage devient un facteur important. Les méthodes implicites peuvent être utiles pour traiter les systèmes raides rapidement, aux dépens de l'exactitude. Si l'objectif est la précision, les méthodes explicites d'ordre élevé devraient plutôt être considérées.
- ★ **Systèmes de simulation précis** : De tels systèmes utilisent généralement les modèles mécaniques complexes sur des maillages raffinés. Les modèles de mécanique des milieux continus conviendraient mieux à ces systèmes. Les petits pas de temps sont nécessaires non seulement pour avoir une simulation précise, mais également pour tous les phénomènes de collision qui doivent être reproduits exactement. En utilisant des systèmes de particules, les méthodes d'intégration explicites d'ordre élevé sont souvent appropriées.

## 4.3 La simulation de tissu et de vêtement par un modèle physique

Le modèle présenté ici est un croisement entre un modèle basé sur la mécanique des milieux continus et un système de particules. Nous avons utilisé un maillage triangulaire irrégulier pour présenter le tissu. Pour cela, nous avons choisi la méthode des éléments finis du premier ordre. Cette méthode nous a permis de résoudre l'équation du mouvement et ceci en nous basant sur le modèle de Pascal Volino présenté dans [88]. Dans ce modèle, il est montré que l'utilisation d'une représentation continue simplifiée comme la technique des éléments finis du premier ordre qui permet d'obtenir un bon compromis entre précision et vitesse de calcul. Ce modèle consiste donc à présenter le tissu par un système de particule, dont chaque triangle du maillage représente un élément. Chaque élément est traité séparément pour réaliser ensuite un assemblage qui satisfait l'équilibre des forces en chaque sommet. En effet ce modèle permet d'exprimer explicitement et précisément l'état de contrainte et de déformation dans la surface d'un triangle de tissu en fonction des positions et des forces de ses sommets.

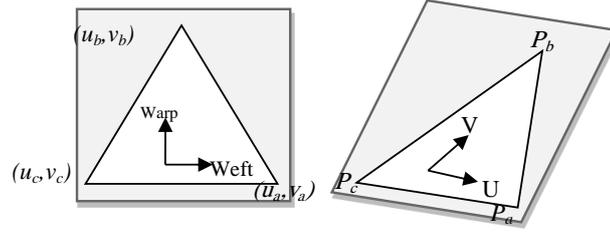


FIGURE 4.1 – Un triangle à l'état initial défini par les coordonnées paramétriques 2D de ses sommets (à gauche), et après sa déformation définie par les coordonnées 3D de ses sommets (à droite) [88]

Le but est de calculer l'état de déformation d'un triangle directement à partir des positions de leur sommet. Chaque élément (triangle) est défini par les coordonnées paramétriques 2D  $(u_a, v_a), (u_b, v_b), (u_c, v_c)$  de ses sommets et par les coordonnées 3D (les positions de ses sommets)  $P_a, P_b, P_c$  après sa déformation. Les vecteurs  $U$  et  $V$  dans la direction de trame (weft) et chaîne (warp) sont exprimés en coordonnées 3D, ils seront utilisés pour mesurer l'état de déformation d'un élément. Au début, dans une étape de prétraitement on calcule les facteurs de distribution des sommets des triangles comme suit [88] :

$$\begin{cases} r_{ua} = d^{-1}(v_b - v_c) & r_{va} = d^{-1}(u_c - u_b) \\ r_{ub} = d^{-1}(v_c - v_a) & r_{vb} = d^{-1}(u_a - u_c) \\ r_{uc} = d^{-1}(v_a - v_b) & r_{vc} = d^{-1}(u_b - u_a) \end{cases} \quad (4.6)$$

$$d = u_a(v_b - v_c) + u_b(v_c - v_a) + u_c(v_a - v_b) \quad (4.7)$$

Durant la simulation, on doit calculer à chaque itération les forces appliquées aux particules pour déterminer leurs vitesses et positions correspondantes. Pour cela, et selon le travail proposé dans [88], on calcule pour chaque élément du tissu les caractéristiques : - Les vecteurs  $U$  et  $V$  par l'équation suivante :

$$U = \sum_{i \in (a,b,c)} r_{ui} P_i \quad V = \sum_{i \in (a,b,c)} r_{vi} P_i \quad (4.8)$$

Dans ce cas, chaque vecteur  $U$  et  $V$  correspond à la somme des positions courantes des sommets du triangle. Ces positions sont pondérées par les facteurs de distribution calculés à l'aide de la formule (4.6) donnée précédemment.

- Les valeurs de déformation (strain values)  $\varepsilon_{uu}, \varepsilon_{vv}, \varepsilon_{uv}$  par l'équation (4.9).

$$\begin{cases} \varepsilon_{uu} = (1/2)(U^T U - 1) \\ \varepsilon_{vv} = (1/2)(V^T V - 1) \\ \varepsilon_{uv} = (1/2)(U^T V + V^T U) \end{cases} \quad (4.9)$$

- les valeurs des contraintes (stress values)  $\sigma_{uu}, \sigma_{vv}, \sigma_{uv}$  par l'équation (4.10) ci-dessous en utilisant le comportement mécanique du matériel ayant seulement la propriété d'élasticité.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{uu} \\ \sigma_{vv} \\ \sigma_{uv} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \varepsilon_{uu} \\ \varepsilon_{vv} \\ \varepsilon_{uv} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Dans ce cas, la matrice symétrique  $E$  représente la rigidité élastique du matériel. À partir des équations précédentes, on détermine les forces des sommets du triangle courant  $F_a, F_b, F_c$  selon l'équation suivante :

$$F_j = -|d|/2(\sigma_{uu}(r_{uj}U) + \sigma_{vv}(r_{vj}V) + \sigma_{uv}(r_{uj}V + r_{vj}U)) \quad (4.11)$$

Une simulation plus réaliste du mouvement du vêtement nécessite l'ajout explicite de paramètres tels que : le vent, la gravité et le frottement. Ces paramètres sont modélisés par des forces externes notées respectivement  $F_{gr}, F_{fr}$  et  $F_v$ . La gravitation  $F_{gr}$  est une force simple à représenter, dirigée vers le bas et proportionnelle à la masse. Son expression est :

$$\vec{F}_{gr} = m_{i,j} \cdot \vec{g} \quad (4.12)$$

où :  $\|\vec{g}\| = 9.81N/kg$

La force de frottement  $F_{fr}$  est souvent introduite pour donner une certaine stabilité à la simulation. Elle agit directement en sens opposé sur la vitesse de particule par l'équation suivante :

$$\vec{F}_{fr} = -C\vec{V} \quad (4.13)$$

Où  $C$  est le coefficient de viscosité du milieu.

L'effet du vent sur le tissu est calculé pour chaque triangle individuellement. La force du vent  $F_v$  appliquée à chaque particule sera donc la somme de la force du vent appliquée à ses triangles voisins. Cette force doit être calculée à chaque itération par :

$$F_v = N * (\|N\| \cdot V_v) \quad (4.14)$$

Où  $N$  est la normale du triangle ayant la norme  $\|N\|$  et  $V_v$  : la vitesse du vent. L'algorithme suivant résume les étapes précédentes :

---

**Algorithme 1** Algorithme Calcul force

---

Prétraitement

1 : **Pour** chaque élément (triangle)

2 : calculer et sauvegarder les facteurs de distribution des sommets en utilisant la formule (4.6)

Traitement

1 : **Pour** chaque élément,

2 : calculer les vecteurs  $U$  et  $V$  à partir de  $P_a, P_b, P_c$  en utilisant la formule (4.8);

3 : Calculer les valeurs des déformations  $\varepsilon_{uu}, \varepsilon_{vv}, \varepsilon_{uv}$  en utilisant la formule (4.9);

4 : Calculer les valeurs des contraintes  $\sigma_{uu}, \sigma_{vv}, \sigma_{uv}$  en utilisant la formule (4.10);

5 : Calculer les forces des particules  $F_a, F_b$  et  $F_c$  en utilisant la formule (4.11);

6 : Ajouter aux forces des particules les forces externes du vent, de la gravité et

du frottement, notées respectivement  $F_{gr}, F_{fr}$  et  $F_v$  en utilisant respectivement

les équations (4.12, 4.13, 4.14);

7 : **Fpour**

8 : **Fin**

---

### 4.3.1 Choix de la méthode d'intégration

Pour déterminer les nouvelles positions et vitesses des particules, nous pouvons utiliser n'importe quelle méthode d'intégration. Différentes méthodes sont utilisées dans la littérature, les méthodes explicites sont très simples et faciles à implémenter, mais pour assurer la convergence du système il faut utiliser un pas de temps très petit [86]. Les méthodes implicites ont prouvé leur convergence, mais elles diffèrent par leur complexité, leur précision et leur stabilité. La majorité de ces méthodes ont montré que l'utilisation du Jacobien avec une évaluation précise est nécessaire pour avoir une bonne convergence et stabilité de la simulation [2, 86, 88]. Mais l'évaluation du Jacobien est très compliquée en terme de compréhension et de calcul de sa formule.

Dans ce travail, nous avons commencé par le choix de la méthode d'Euler explicite. En implémentant cette méthode d'intégration, nous avons remarqué que le système diverge dès les premières itérations, il fallait utiliser la méthode de correction de positions que nous avons proposée (voir section 4.4) pour assurer la stabilité de la simulation. Par la suite, nous avons implémenté une autre méthode explicite qui est la méthode d'Euler modifiée. Nous avons constaté qu'elle nécessite également une correction des positions de particules pour assurer la convergence.

Nous avons essayé donc de tirer profit des méthodes implicites, pour cela nous avons implémenté la méthode d'Euler implicite et ceci sans la résolution d'un grand système linéaire ni l'utilisation du Jacobien. Notre contribution consiste à calculer d'abord les forces de toutes les particules ensuite faire le calcul des vitesses et des positions des particules. De cette manière, nous pouvons calculer la vitesse de

chaque particule en fonction de sa force au temps  $t + h$  et non pas au temps  $t$ , ce qui est le principe des méthodes implicites.

---

**Algorithme 2** Algorithme calcul vitesse position

---

/\* Dans cet algorithme on utilise le pas du temps  $h$ , avec  $F_i^{(t+h)}$  représente la somme des forces appliquées à la particule  $i$  à l'itération  $t + h$  et  $V_i^t$  et  $V_i^{(t+h)}$  respectivement  $P_i^t$  et  $P_i^{(t+h)}$  qui représentent respectivement les vitesses et les positions de la particule  $i$  aux itérations  $t$  et  $t + h$ . \*/

1 : **Début**

2 : Calcul force ; // Calcul des forces de toutes les particules

3 : **Pour** (chaque particule  $i$ )

4 :  $V_i^{(t+h)} = V_i^t + h(F_i^{(t+h)}) / (2 * m_i)$

5 :  $P_i^{(t+h)} = P_i^t + hV_i^{(t+h)}$

6 : **Fpour**

7 : **Fin**

---

Nous avons pu obtenir avec cette méthode des résultats stables dans le cas d'animation des pièces de tissu de faible résolution (avec un nombre réduit de particules) mais une fois la résolution augmente il devient nécessaire de corriger les positions des particules pour assurer la convergence.

## 4.4 Correction des positions

La méthode de la dynamique inverse a été utilisée pour la première fois par Provot [70] du fait qu'elle permet de corriger la sur-élongation des ressorts dans le système masse-ressort. Néanmoins, nous n'avons pas pu éviter la divergence de notre simulation avec cette méthode puisque les valeurs des positions augmentent rapidement ce qui entraîne toujours l'augmentation des forces et des vitesses et par conséquent la déchirure de tissu.

Nous avons proposé donc de corriger ces valeurs en limitant le déplacement de chaque particule c'est-à-dire si la distance entre deux positions successives excède une certaine valeur (seuil déterminé après plusieurs tests) on doit corriger la position de la particule. La correction consiste donc à ajouter la moitié de la différence entre les deux positions successives de la particule considérée à sa position précédente (sa position à l'instant  $t - 1$ ), la correction doit être appliquée plusieurs fois selon la taille et la forme de tissu jusqu'à ce qu'on assure une convergence du modèle. Le principe de notre méthode de correction de position peut être résumé dans l'algorithme suivant :

---

**Algorithme 3** Algorithme Correction de position

---

```
1 :Début
2 :   Pour (chaque particule)
3 :     Pour ( $nb = 1/n_i t$ ) //  $n_i t$  : nombre d'itérations
        /* Calculer la différence diff entre les positions P à l'instant t et t+1 du
particule :
4 :        $diff = P^{t+1} - P^t$  ;
        /* Calculer la distance dist entre les positions P à l'instant t et t + 1 du
particule :
5 :        $dist = ||diff||$  ;
6 :       Si ( $dist > seuil$ ) alors
        /* Corriger la position courante :
7 :          $P^{t+1} = P^t + diff/2$  ;
8 :       Finsi
9 :     Fpour
10 :    Si ( $dist > seuil$ ) alors
        /* Corriger la vitesse selon le pas de temps h :
11 :       $V_{t+1} = (P^{t+1} - P^t)/h$  ;
12 :    Finsi
13 :  Fin pour
14 : Fin
```

---

Cette méthode nous a permis de réduire le taux d'erreur du déplacement (voir section 4.6).

## 4.5 La gestion de collision

Une simulation physique d'objets rigides ou non rigides peut se diviser en trois étapes majeures. Ces étapes sont à résoudre aussi efficacement que possible, mais également aussi précisément que nécessaire. Ces étapes sont :

1. le calcul de la dynamique des objets basée sur les forces et les interactions du maillage ;
2. la détection des collisions entre les objets de la scène c'est-à-dire la détection du contact géométrique entre deux surfaces et
3. le calcul du traitement des collisions, c'est-à-dire comment ce contact géométrique peut-il affecter le comportement du tissu, et comment ce changement s'intègre efficacement dans la simulation.

Dans le cas particulier de la simulation de textiles, une étape importante consiste donc à déterminer les interactions ou les pénétrations du tissu avec lui-même ou avec son entourage. Nous avons montré que l'utilisation des éléments finis du premier ordre exprimés comme des systèmes de particules permet une modélisation du mouvement d'un tissu, dont le calcul de la trajectoire des particules est effectué en intégrant un système d'équations différentielles (phase 1). Les valeurs initiales de ce système, c'est-à-dire les positions et les vitesses initiales, étant fournies au départ de la simulation. Nous devons ensuite détecter les éventuelles collisions du

tissu avec d'autres objets (phase 2) et les traiter en ajustant les vitesses et/ou les positions des particules (phase 3).

Dans ce travail, nous avons essayé de gérer le problème de collision du tissu avec des primitives simple comme la sphère et le cylindre. Le principe de la gestion de collision avec ces objets est dans ce cas plus simple. En effet, à chaque itération, on teste si la particule est à l'intérieur de l'objet. Dans le cas de la sphère, par exemple, on teste si la distance entre la position de la particule et son centre est inférieure à son rayon. Si c'est le cas alors il y a collision et il faut donc déplacer la particule au plus proche point dans la surface de la sphère.

---

**Algorithme 4** Algorithme gestion de collision

---

```
1 : Début
2 :   Pour (chaque particule)
3 :     calculer la distance (d) entre la particule et le centre de la sphère
4 :     si (d < (rayon de la sphère)) alors
5 :       V= (position de la particule) - (centre de la sphère);
6 :       V1= Normaliser(V);
7 :       V2= V1* rayon;
8 :       Position de la particule= position de la particule + V2;
9 :       /* On projette la particule sur la surface de la sphère
10 :     Fin si
11 :   Fin pour
12 : Fin
```

---

## 4.6 Résultats expérimentaux

Dans cette section, nous présentons les résultats de notre méthode d'animation de tissu. Les simulations sont exécutées sur un processeur Intel (R) *Core™ I5-3470* CPU @3.20 GHz et 4Go de RAM. Les modèles de tissus et de vêtements que nous avons utilisés sont représentés par un maillage triangulaire irrégulier par Fashionizer (un outil de conception de vêtements virtuels, développé au Laboratoire MIRALab à l'université de Genève).

Dans nos tests expérimentaux, nous avons utilisé différentes pièces de tissus ayant des tailles et des résolutions (nombre de triangles) différentes. Les résultats montrent que le temps d'exécution augmente d'une façon exponentielle avec l'augmentation de la résolution du maillage (voir figures 4.2, 4.3 et 4.4).

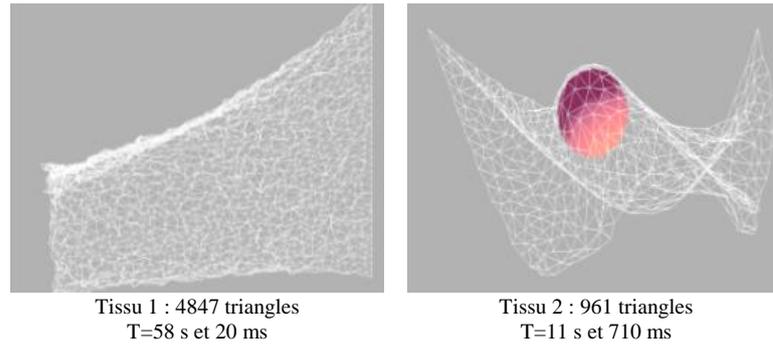


FIGURE 4.2 – Animation de pièces de tissus (Méthode d’Euler, 2000 itérations)

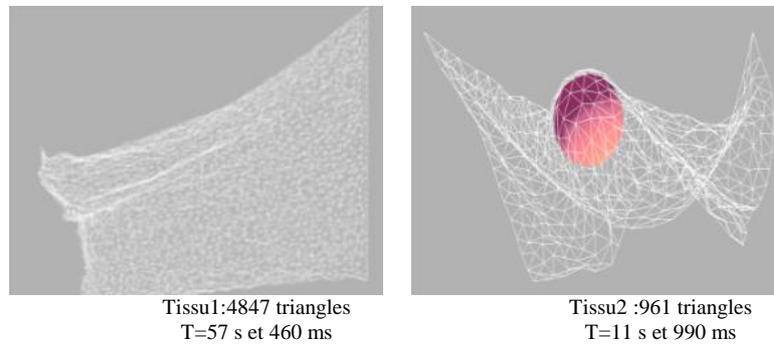


FIGURE 4.3 – Animation de pièces de tissus (Méthode d’Euler modifiée, 2000 itérations)

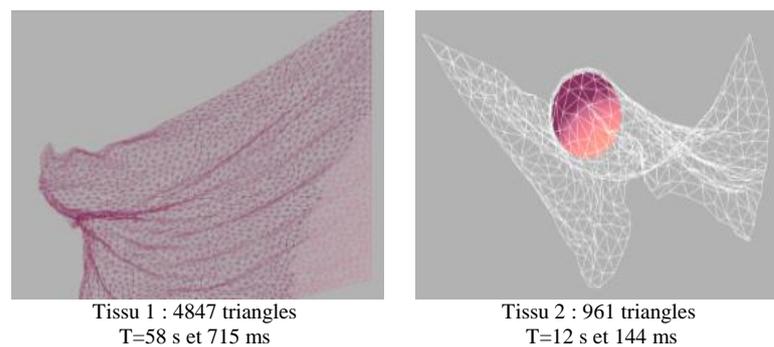


FIGURE 4.4 – Animation de pièces de tissus (Méthode d’Euler implicite, 2000 itérations)

Les figures ci-dessus nous montrent des animations de pièces de tissus avec des méthodes d’intégration différentes. Nous avons remarqué que le mouvement avec les méthodes d’Euler explicite est un peu rigide, tandis qu’avec la méthode implicite l’animation est plus réaliste.

Les exemples suivants (figure 4.5, 4.6 et 4.7) nous montrent l'utilité de la méthode de correction des positions des particules. Nous pouvons remarquer la divergence du modèle : dès les premières itérations (méthodes explicites) et après quelques itérations avec la méthode implicite

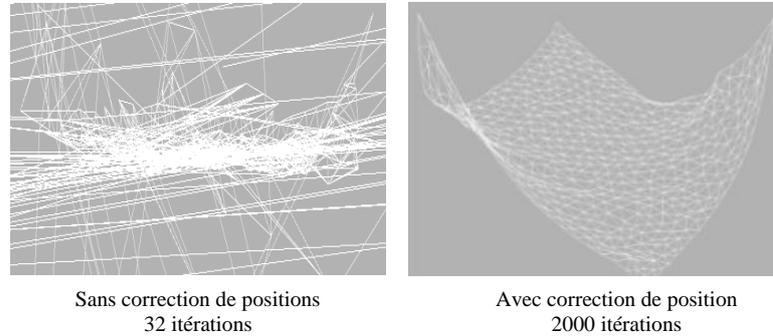


FIGURE 4.5 – Animation d'une pièce de tissu de 990 triangles (Méthode d'Euler)

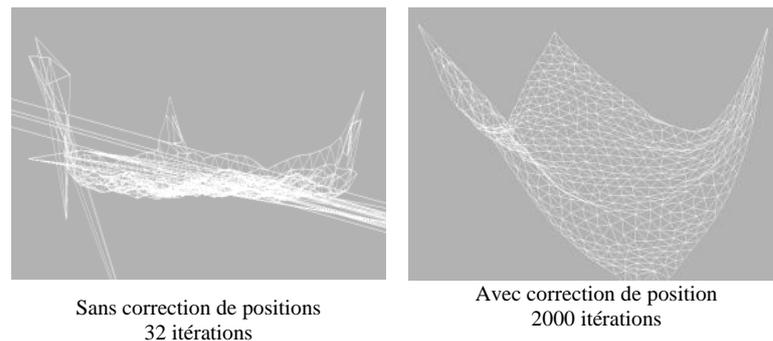


FIGURE 4.6 – Animation d'une pièce de tissu de 990 triangles (Méthode d'Euler modifiée)

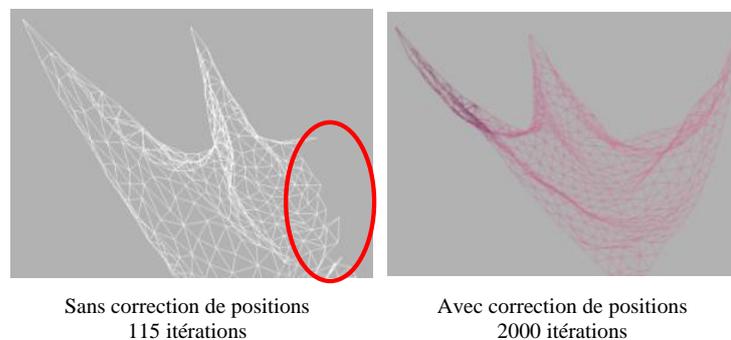


FIGURE 4.7 – Animation d'une pièce de tissu de 990 triangles (Méthode d'Euler implicite)

#### 4.6. Résultats expérimentaux

---

Nous illustrons dans les exemples ci-dessous l'animation de pièces de tissu de différents types de tissu (coton, lin et soie). Dans les figures 4.8, 4.9 et 4.10, nous montrons que le mouvement du tissu dépend de son type c.-à-d. les propriétés physiques du tissu.

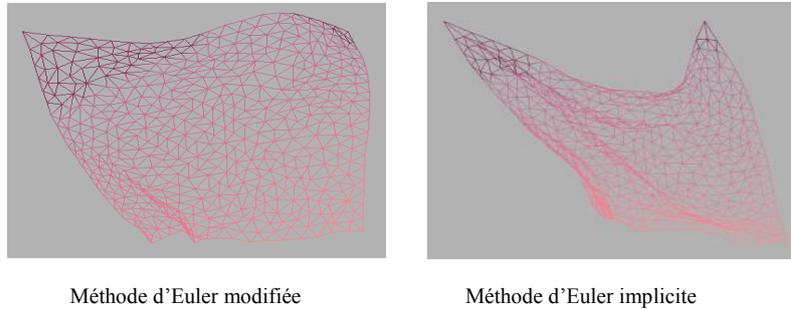


FIGURE 4.8 – Animation d'une pièce de tissu en coton de 990 triangles avec 2000 itérations et un pas de temps 0.001

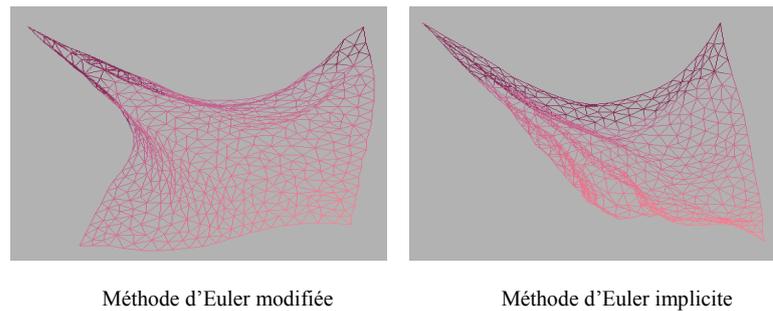


FIGURE 4.9 – Animation d'une pièce de tissu en lin de 990 triangles avec 2000 itérations et un pas de temps 0.001

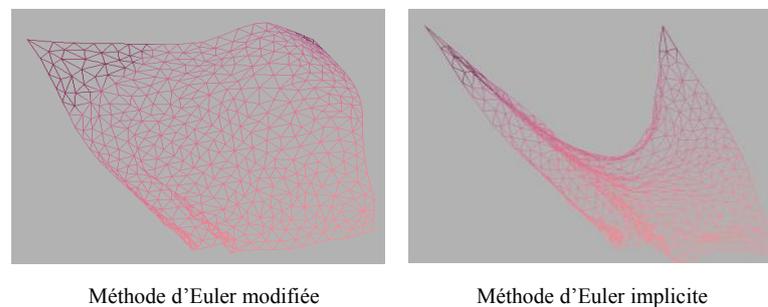


FIGURE 4.10 – Animation d'une pièce de tissu en soie de 990 triangles avec 2000 itérations et un pas de temps 0.001

#### 4.6. Résultats expérimentaux

La forme de tissu influe aussi sur la simulation, dans les exemples ci-dessous (figures 4.11, 4.12 et 4.13) nous avons essayé de changer la forme de tissu en animant des vêtements de différents types de tissu (coton, lin et soie). En effet les tests concernant l'animation sans correction des positions (voir figures 4.11.a, 4.12.a, 4.13.a) ont généré une divergence dans le calcul des forces appliquées aux particules. Ce qui induit après un certain nombre d'itérations la divergence dans le calcul des vitesses et des positions des particules (cas du vêtement avec le lin dans la figure 4.12. a). Ceci est dû à l'augmentation de la distance entre les particules du tissu au fur et à mesure du processus d'animation.

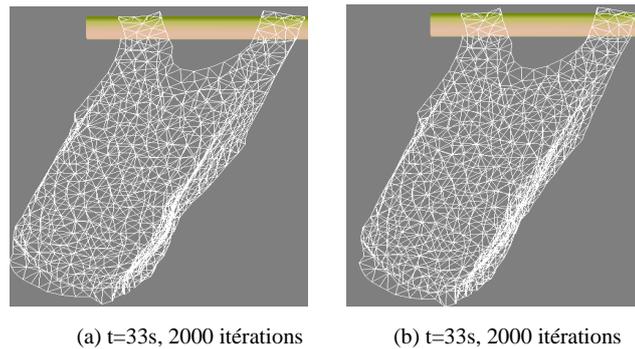


FIGURE 4.11 – Animation d'un vêtement en Coton (a) Sans correction des positions  
(b) avec correction des positions

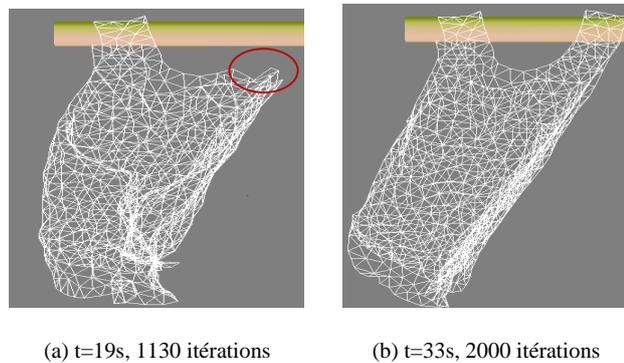


FIGURE 4.12 – Animation d'un vêtement en Lin (a) Sans correction des positions  
(b) avec correction des positions

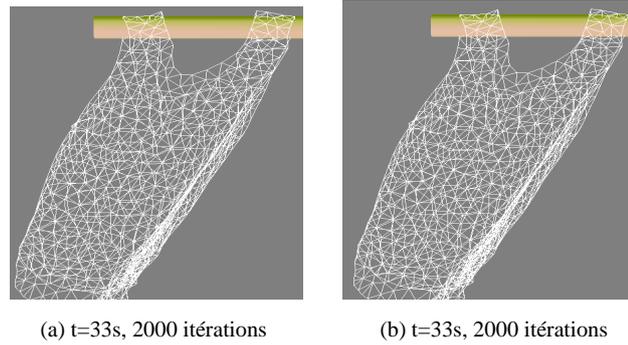


FIGURE 4.13 – Animation d’un vêtement en Soie (a) Sans correction des positions  
(b) avec correction des positions

### 4.6.1 Etude comparative

Volino et al. ont mentionné dans [88] que l’utilisation des méthodes implicite dans la résolution des équations du mouvement peut donner des résultats satisfaisants pour cela ils ont proposé une méthode de calcul du Jacobien . Cette méthode leur permet d’avoir une simulation stable (un exemple est illustré dans figure 4.14). Mais puisque l’évaluation du Jacobien est un peu compliquée et nécessite toujours un calcul additionnel. Nous avons proposé une méthode implicite efficace sans aucun calcul supplémentaire (voir section 4.3.1). Un exemple d’animation stable est illustré dans la figure 4.15.



FIGURE 4.14 – Un calcul précis du Jacobien est nécessaire pour avoir une simulation stable [88]

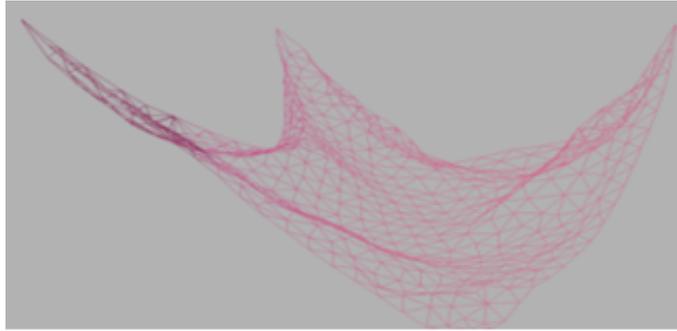


FIGURE 4.15 – Tissu suspendu en 3 points (la simulation reste stable)

### 4.6.2 Discussion des résultats

D'après les résultats obtenus nous pouvons conclure que :

- Plus la résolution de maillage augmente plus le temps d'exécution augmente.
- L'utilisation des méthodes d'intégration explicite ou implicite nécessite la correction de positions des particules pour obtenir des simulations stables. Mais avec les méthodes explicites, il faut appliquer la méthode de correction de positions avec plus d'itérations qu'avec la méthode implicite.
- Avec la méthode d'intégration implicite, nous avons pu obtenir des mouvements de tissu plus réaliste.
- La correction de positions nous a permis d'obtenir des résultats plus acceptables avec plus d'itérations.
- Le mouvement de tissu dépend des propriétés physiques de tissu et de sa forme.
- Il est difficile de fixer les paramètres des forces externes, car chaque pièce de tissu nécessite des paramètres différents (selon sa taille, sa forme, sa position et son type).

## 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre modèle d'animation de tissu et de vêtement basé sur la méthode des éléments finis du premier ordre. Nous avons exprimé ce modèle par un système de particule simple. Afin de contribuer à la résolution du problème de la divergence du modèle au cours de la simulation, nous avons proposé une implémentation efficace de la méthode d'Euler implicite. La méthode proposée nous a permis d'éviter les calculs additionnels tels que la résolution d'un grand système linéaire ou l'utilisation du Jacobien.

Néanmoins, le problème de la divergence de la simulation reste posé surtout avec l'augmentation de la résolution du maillage ou le changement des propriétés physiques du tissu, pour cela et pour assurer la convergence de notre modèle, nous avons proposé une méthode qui permet de corriger les positions des particules. Avec cette méthode, nous avons pu obtenir des résultats plus satisfaisants. Puisque

le temps d'exécution augmente avec l'augmentation de la résolution du maillage, nous allons exploiter la multi-résolution dans notre simulation. Les détails de cette méthode d'optimisation seront présentés dans le chapitre suivant.

# Simulation multi-résolution de tissus et de vêtements

## Sommaire

---

5.1	Introduction . . . . .	<b>66</b>
5.2	Intégration de la multi-résolution dans la simulation de tissu et de vêtements . . . . .	<b>67</b>
5.2.1	Méthode de subdivision (Schéma polyédral) . . . . .	68
5.2.2	Critère de subdivision . . . . .	70
5.2.3	Annulation d'une subdivision . . . . .	70
5.3	Évaluation des résultats expérimentaux . . . . .	<b>72</b>
5.3.1	Méthode d'intégration implicite . . . . .	72
5.3.2	Méthode de correction de positions de particule vs pas du temps . . . . .	73
5.3.3	Forme et position de tissu . . . . .	75
5.3.4	Seuil utilisé dans la méthode de correction de position . . . . .	75
5.3.5	Critère de subdivision . . . . .	78
5.3.6	Nombre de niveaux de détails et forme de tissu VS nombre de triangles du maillage . . . . .	79
5.3.7	Résolution du maillage VS temps d'exécution . . . . .	80
5.3.8	Etude comparative . . . . .	82
5.3.9	Discussion des résultats . . . . .	83
5.4	Conclusion . . . . .	<b>83</b>

---

## 5.1 Introduction

**D**ans ce chapitre, nous présentons un modèle d'animation multi-résolution de tissu et de vêtement basé sur la méthode des éléments finis du premier ordre. Nous avons exprimé ce modèle par un système de particules simple pour exploiter

ensuite la multi-résolution. Cette méthode permet d'améliorer la simulation tout en minimisant le temps de calcul.

La majorité des travaux antérieurs exploitant la multi-résolution ont utilisé des modèles discrets comme les systèmes masse-ressort en combinaison avec l'une des méthodes de subdivisions. L'inconvénient majeur de tels systèmes est la difficulté d'ajustement de leurs paramètres, ce qui ralentit la convergence du modèle surtout en utilisant différents niveaux de détails. Les modèles basés sur la méthode des éléments finis du premier ordre fonctionnent sur des maillages de triangles arbitraires, pas forcément réguliers. Néanmoins, le problème de la divergence de la simulation reste posé aussi pour l'exploitation de la multi-résolution. Pour cela pour assurer la convergence de notre modèle, nous avons tout d'abord implémenté notre méthode d'intégration implicite pour la résolution des équations du système. Par la suite, nous avons intégré la méthode de correction de positions des particules que nous avons proposée. Nous avons pris en compte des critères tels que l'angle de subdivision, la forme du tissu et le nombre du niveau de détails utilisés afin d'améliorer notre simulation.

Ce chapitre présentera notre méthode d'intégration de la multi-résolution dans notre modèle de simulation de tissus et de vêtements. Pour cela, nous allons détailler les points essentiels dans le processus d'intégration de la multi-résolution à savoir la méthode de subdivision choisie, le critère de subdivision ainsi que la méthode d'annulation de la subdivision. Une grande partie du chapitre sera réservée à une évaluation des résultats obtenus.

## **5.2 Intégration de la multi-résolution dans la simulation de tissu et de vêtements**

La résolution du maillage dans une simulation joue un rôle important. Le choix de la résolution du maillage qui représente le tissu/vêtement est crucial dans la simulation de vêtement. Ainsi, le coût de calcul dépend directement de la résolution du maillage. Cette dernière détermine la finesse des détails des vêtements (les plis). La majorité des méthodes de simulation de vêtements utilise un maillage à résolution uniforme, bien que, les détails géométriques ne sont pas répartis uniformément. Dans ce cas, une résolution trop fine risque d'accroître le temps d'exécution alors qu'un maillage simplifié conduit à une perte de détails. La distribution des nœuds de maillage de surface de tissu selon le niveau de détail pourrait alors réduire sensiblement le coût de calcul.

Pour résoudre ce problème, nous avons proposé la représentation du maillage par différents niveaux de détails NDDs. Ceci va nous permettre de raffiner la résolution du maillage dans les parties nécessitant plus de détails et de représenter les zones suffisamment plates par une résolution grossière. Cette opération se traduit par une procédure de subdivision et de simplification au cours de l'animation. Afin de réaliser le principe de la multi-résolution, nous avons utilisé le schéma de subdivision et les critères de subdivision et de simplification implémentée dans [3] qui utilise un système masse-ressort. Cependant dans ce travail, nous avons implémenté ce même schéma avec un maillage irrégulier généré par la triangulation de Delaunay et la méthode des éléments finis. De plus, nous avons utilisé la méthode de correction des positions des particules que nous avons proposée afin d'éviter

la divergence de notre simulation. Dans notre modèle, le tissu est simulé par un système de particules, ce dernier est représenté par un maillage triangulaire irrégulier. Chaque particule a une masse  $m$ , une position  $P$  et une vitesse  $V$ . A chaque étape de la simulation, nous effectuons les phases suivantes :

1. Calculer les forces appliquées à chaque particule (voir la section 4.3 du chapitre précédent)
2. Déterminer la nouvelle vitesse et position de chaque particule (voir la section 4.3.1 du chapitre précédent).
3. Effectuer la correction des positions (voir section 4.4 du chapitre précédent) afin d'améliorer l'animation et d'exploiter la multi-résolution.
4. Gérer la mise à jour des positions s'il y'a une éventuelle collision du tissu avec une quelconque primitive d'une scène plus réaliste (voir la section 4.5 du chapitre précédent).
5. Réaliser l'adaptation de la résolution du maillage (voir les sections suivantes).

Dans ce qui suit, nous détaillons la cinquième étape de notre processus de simulation, puisque les quatre premières étapes sont expliquées dans le chapitre précédent. Le principe de l'intégration de la multi-résolution peut être résumé dans les étapes suivantes :

1. Sélectionner la liste des triangles à subdiviser selon le critère de subdivision (voir la section 5.2.2).
2. Sélectionner la liste des triangles dans les zones suffisamment plates.
3. Effectuer la subdivision (voir la section 5.2.1)
4. Effectuer l'annulation de la subdivision (voir la section 5.2.3)

### **5.2.1 Méthode de subdivision (Schéma polyédral)**

Nous avons choisi le schéma dit polyédral [73] pour subdiviser un triangle, ce schéma conserve la forme originale du triangle subdivisé, car il induit localement un grand nombre de triangles semblables. De plus, ce schéma est caractérisé par un procédé simple présentant une faible complexité. Le schéma polyédral consiste à subdiviser un triangle en ajoutant de nouveaux points au milieu de ses arêtes et de nouvelles arêtes reliant ces points (figure 5.1).

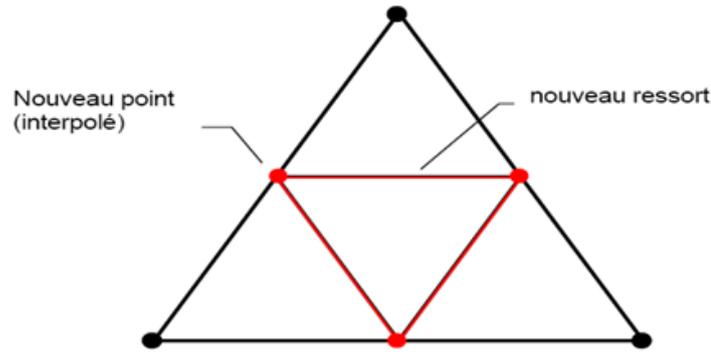


FIGURE 5.1 – Schéma de subdivision polyédral

Le principe de la subdivision peut être résumé par l'algorithme suivant :

---

**Algorithme 5** Algorithme Subdivision

---

```

1 : Début
2 :   Pour (chaque triangle)
3 :     Calculer la normale N1 du triangle T1
4 :     Subdiv = faux ;
5 :     Tant que ((il y a des triangles T2 adjacents au triangle courant) et
(subdiv
= faux))
6 :       Calculer la normale N2 du triangle T2
7 :       Calculer l'angle A entre N1 et N2
8 :       Si (A >  $\alpha$ ) alors
//  $\alpha$  : angle critique de subdivision
// Le triangle T1 doit être subdivisé
9 :         Subdiv = vrai ;
10 :        Faire un retour local au pas précédent.
11 :         $P^{t+1} = P^t$  ;
12 :        Subdiviser le triangle (selon le schéma polyédral)
- Ajouter un nouveau point (particule) au milieu de chaque arête
du
triangle
- Relier les 3 nouveaux points pour construire un nouveau triangle
au centre de T1 et par conséquent trois autres triangles seront ajou-
tés
        (figure 5.1)
13 :        Calculer les positions des particules des triangles construits
14 :        Sinon
15 :          Aller au triangle adjacent suivant
16 :        Fin si
17 :      Fin TQ
18 :    Fpour
19 : Fin

```

---

### 5.2.2 Critère de subdivision

Notre critère de subdivision concerne la valeur de l'angle entre les normales des deux triangles ayant une arête commune (figure 5.2). En effet, selon [12] si cet angle excède une certaine valeur critique  $\alpha$ , on applique une subdivision. À chaque niveau supplémentaire, l'angle critique augmente pour pondérer l'importance des irrégularités : le même angle entre deux petits triangles est moins gênant qu'entre deux grands triangles. On ajoute donc  $\beta$  à l'angle critique pour chaque niveau supplémentaire

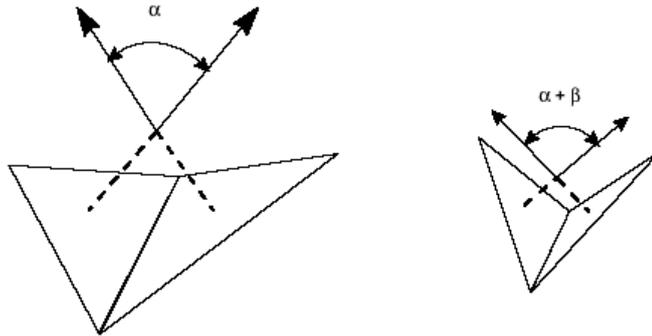


FIGURE 5.2 – Augmentation de l'angle critique lorsque l'aire des triangles diminue

Le choix de  $\alpha$  et  $\beta$  dépend du degré de précision qu'on souhaite obtenir. De plus, le nombre de niveaux de détails dépend des valeurs choisies de ces angles et de la forme initiale du maillage [3].

### 5.2.3 Annulation d'une subdivision

Pour optimiser le rendu, nous avons essayé d'annuler la subdivision dans les zones suffisamment plates. Ainsi, il y'a lieu de détecter les zones plates en calculant les angles entre les normales des triangles subdivisés. Si on trouve que les triangles dans une zone raffinée sont suffisamment plats, on exécute un retour local au pas précédent. Les particules faisant partie à cette zone sont remises à l'état précédent. On annule, ensuite la subdivision tout en recalculant les positions et les vitesses des particules restantes dans cette zone. Ceci peut être traduit par l'algorithme suivant :

---

**Algorithme 6** Algorithme Annulation de subdivision

---

```

1 : Début
2 :   Pour(chaque triangle)
3 :     Si (le triangle  $T$  est déjà subdivisé) alors
4 :        $I = 0$ ;
5 :       Annulé=faux;
6 :       Calculer la normale  $N1$  du triangle de centre  $T1$ 
7 :       Pour (chaque triangle  $T2$  adjacent au triangle  $T1$ )
8 :         Calculer la normale  $N2$  du triangle  $T2$ 
9 :         Calculer l'angle  $A$  entre  $N1$  et  $N2$ 
10 :        Si ( $(A \geq 0)$  et ( $A \leq \beta$ )) alors //  $\beta$  est un angle suffisamment petite
11 :           $I = I + 1$ ;
12 :        Fin si
13 :      Fpour
14 :      Si ( $I = 3$ ) alors
15 :        Annulé = faux;
16 :        Tant que ((il y a des triangles  $T3$  adjacent au triangle  $T$ ) et
(Annulé = faux))
17 :          Calculer la normale  $N3$  de  $T3$ 
18 :          Calculer l'angle  $A1$  entre  $N1$  et  $N3$ 
19 :          Si ( $(A1 \geq 0)$  et ( $A1 \leq \beta$ )) alors
20 :            Annulé=vrai;
21 :          Sinon
22 :            Aller au triangle suivant;
23 :          Fin si
24 :        Fin TQ
25 :        Si (Annulé= vrai) alors // La subdivision de triangle  $T$  doit être
Annulée
26 :           $P^{t+1} = P^t$ ; // Faire un retour local au pas précédent.
27 :          Annulé la subdivision
          -Retirer les triangles et les particules ajoutées dans la phase de
subdivision (figure 5.3)
28 :          Recalculer les positions des particules du triangle  $T$ .
29 :        Fin si
30 :      Fin si
31 :    Fin si
32 :  Fpour
33 :Fin

```

---

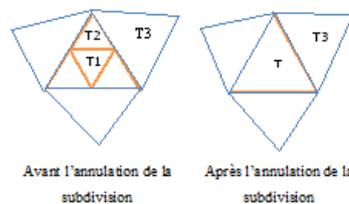


FIGURE 5.3 – Annulation de la subdivision du triangle T

L'annulation d'une subdivision est relativement compliquée, car il faut toujours garder la forme originale du maillage. Nous avons choisi donc de prendre le sens inverse de la subdivision polyédrale, c'est à dire, si nous avons un triangle déjà subdivisé nous faisons une comparaison entre la normale du triangle du centre et celui de chacun des triangles adjacents qui ont été créés lors de la subdivision. Ainsi qu'entre la normale du triangle du centre et celles des triangles adjacents au triangle initial c'est-à-dire le triangle subdivisé. Si on trouve que la surface occupée par les quatre triangles est suffisamment plate, on annule la subdivision, nous éliminons donc les nouveaux points ainsi que les nouvelles arêtes qui ont été ajoutés durant la subdivision pour obtenir le triangle initial (voir l'algorithme précédent).

## 5.3 Évaluation des résultats expérimentaux

Dans cette section nous présentons les résultats de notre méthode d'animation multi-résolution de tissu et de vêtement. Rappelons que les simulations sont exécutées sur un processeur Intel (R) *Core™ I5-3470 CPU @3.20 GHz* et *4Go* de *RAM*. Les modèles de tissus et de vêtements que nous avons utilisés sont représentés par un maillage triangulaire irrégulier généré par Fashionizer (Outil de conception de vêtements virtuels, développé au Laboratoire MIRALab à l'université de Genève).

Dans cette section nous voulons étudier les paramètres ayant des effets sur la convergence de notre modèle de simulation multi-résolution de tissu et de vêtements, pour cela nous avons fait un ensemble de tests expérimentaux dans lesquels nous avons varié les paramètres du modèle ainsi que les formes et les tailles des tissus. Une discussion détaillée sur les résultats obtenus est présentée dans ce qui suit.

### 5.3.1 Méthode d'intégration implicite

Dans un premier temps nous avons essayé de tester la méthode d'intégration d'Euler implicite avec l'intégration de la multi-résolution et sans correction de position. Nous avons remarqué que le modèle converge seulement lorsque le pas du temps  $h$  est trop petit (figure 5.4). En augmentant un peu le pas de temps nous avons constaté que le modèle diverge après un certain nombre d'itérations (déchirure du tissu) (figure 5.5.d).

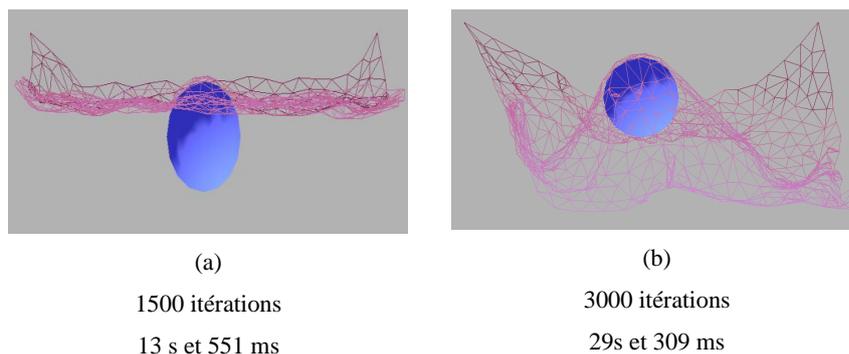


FIGURE 5.4 – Tissu qui tombe sur une sphère sans correction de positions ( $h=0.00005$ )

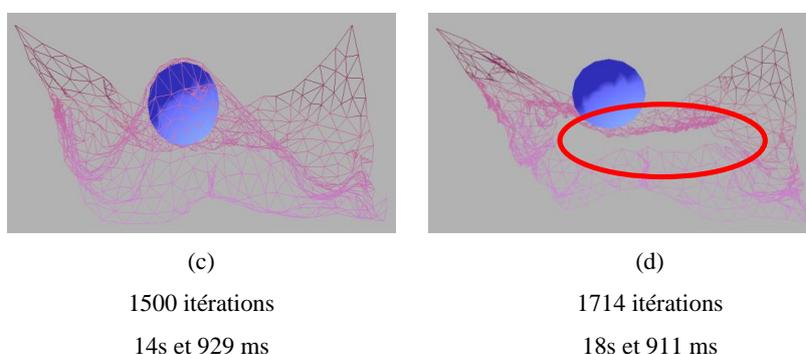


FIGURE 5.5 – Tissu qui tombe sur une sphère sans correction de positions ( $h=0.0001$ )

#### 5.3.2 Méthode de correction de positions de particule vs pas du temps

Afin de résoudre le problème de la divergence, nous avons intégré dans la simulation notre méthode de correction de positions de particules. Nous avons remarqué que si le pas du temps est assez petit nous pouvons appliquer la correction des positions de particules une seule fois à chaque itération de la simulation. Cependant, avec l'augmentation du pas de temps il fallait appliquer la méthode de correction de positions plusieurs fois pour assurer la convergence du modèle (voir les figures ci-dessous).

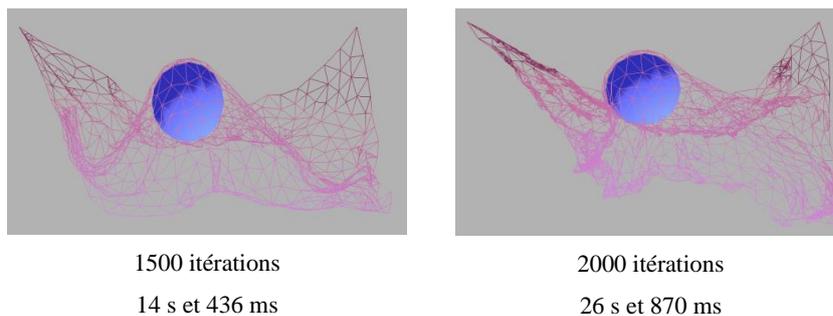


FIGURE 5.6 – Tissu qui tombe sur une sphère avec une itération de correction de positions ( $h= 0.0001$ )

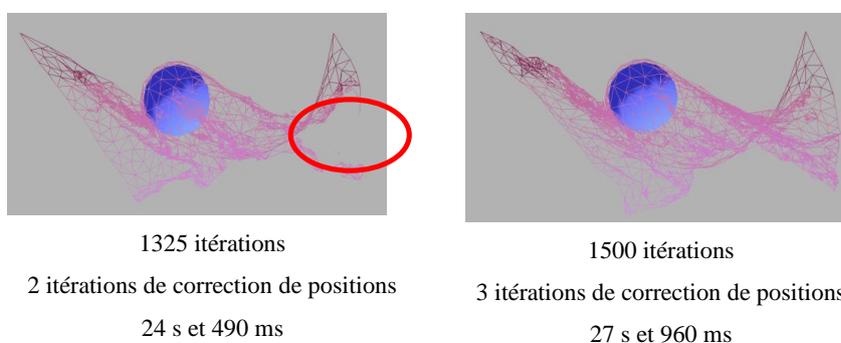


FIGURE 5.7 – Tissu qui tombe sur une sphère avec correction de positions ( $h= 0.0005$ )

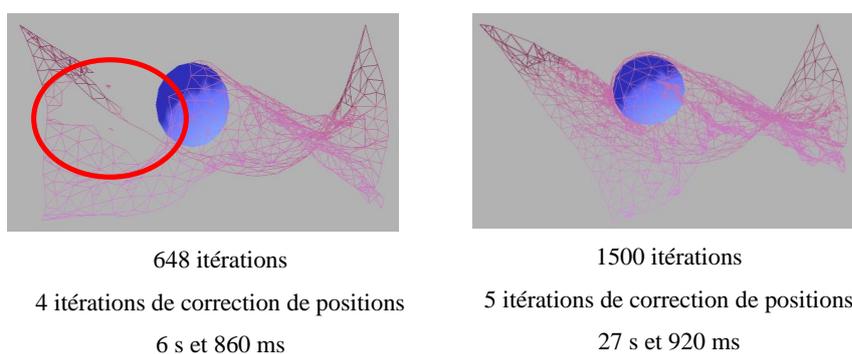


FIGURE 5.8 – Tissu qui tombe sur une sphère avec correction de positions ( $h= 0.001$ ) (méthode d'Euler implicite)

L'exemple suivant nous montre que l'utilisation d'une méthode d'intégration explicite tel que la méthode d'Euler modifiée nécessite aussi l'augmentation du

nombre d'itérations de la méthode de correction de positions de particules pour éviter la déchirure du tissu, dès les premières itérations comme le montre la figure 5.9

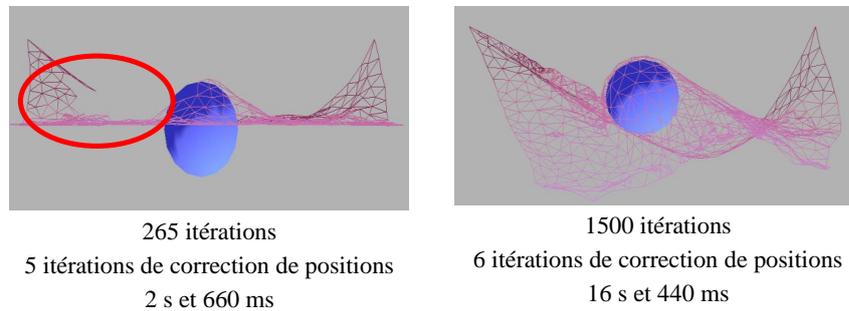


FIGURE 5.9 – Tissu qui tombe sur une sphère avec correction de positions ( $h=0.001$ ) (méthode d'Euler modifiée)

#### 5.3.3 Forme et position de tissu

Nous voulons voir si la forme du tissu et les positions initiales des particules affecte la convergence du modèle, pour cela nous avons choisi une autre pièce de tissu avec le pas du temps  $h$  utilisé dans l'exemple de simulation de la figure 5.7. Nous avons constaté que cette fois (figure 5.10) il fallait augmenter le nombre d'itérations de la méthode de correction de positions pour éviter la déchirure du tissu.

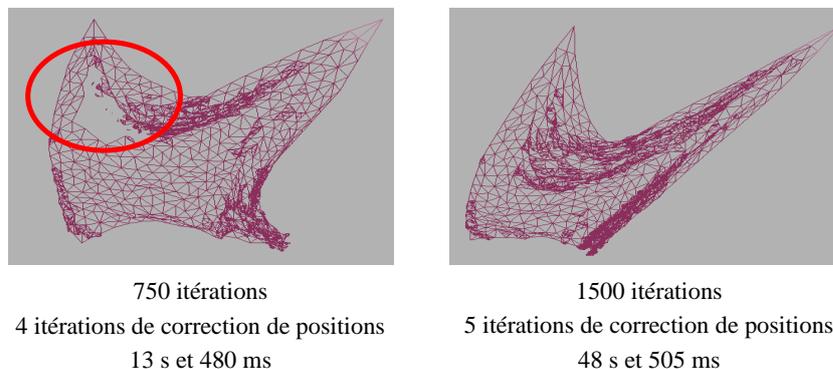


FIGURE 5.10 – Tissu suspendu en 2 points avec correction de positions ( $h=0.0005$ )

#### 5.3.4 Seuil utilisé dans la méthode de correction de position

D'après les exemples précédents, nous pouvons conclure que pour assurer la convergence du modèle et pour avoir une simulation stable avec une méthode d'intégration implicite, il faut intégrer la méthode de correction de positions de particules. Le principe de cette méthode est de calculer la distance entre deux positions successives de chaque particule et si cette distance excède un certain seuil on corrige la position de cette particule. Le problème à ce niveau consiste donc à

### 5.3. Évaluation des résultats expérimentaux

déterminer la valeur de ce seuil. Pour ce faire nous avons effectué plusieurs tests expérimentaux (voir les exemples des figures 5.11 et 5.12), ces derniers nous ont montré que si ce seuil est suffisamment petit la convergence est assurée, tandis que l'augmentation de la valeur du seuil nécessite l'augmentation du nombre d'itérations de la méthode de correction de positions

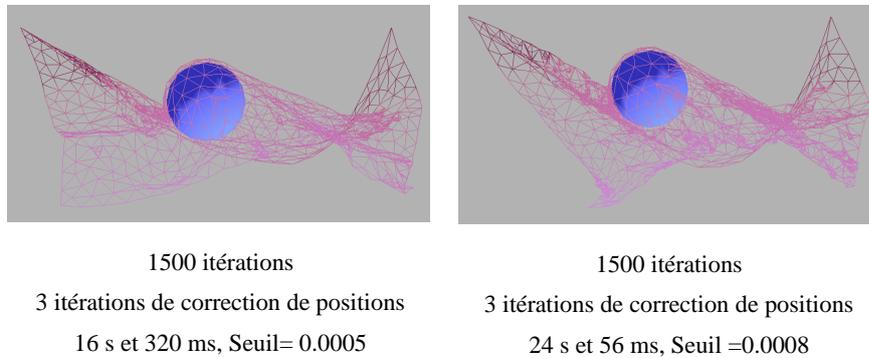


FIGURE 5.11 – Tissu qui tombe sur une sphère avec correction de positions ( $h=0.0005$ )

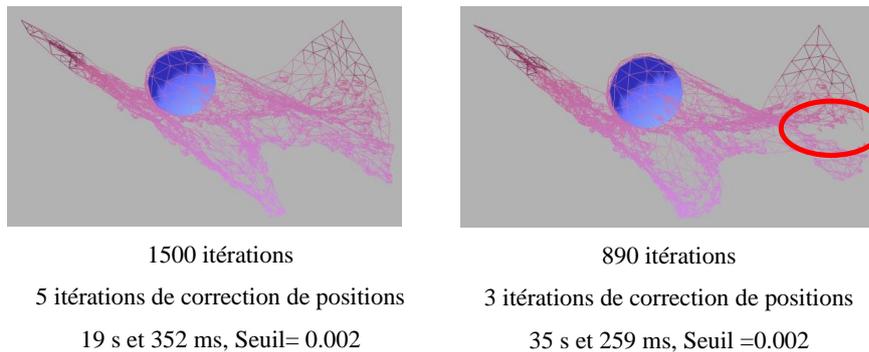


FIGURE 5.12 – Tissu qui tombe sur une sphère avec correction de positions ( $h=0.0005$ )

Pour déterminer des valeurs adéquates du seuil nous avons fait des tests sur la pièce de tissu qui tombe sur une sphère, nous avons donc fixé le pas du temps  $h$  à 0.0005, le nombre d'itérations à 1500 itérations et nous avons essayé de corriger les positions de particule avec 3 itérations. Après plusieurs tests nous avons pu obtenir un intervalle de valeurs de seuil dans lequel le système reste stable. La figure 5.13 nous montre la variation du nombre de corrections de positions en fonction de la valeur de seuil. Nous avons choisi l'intervalle suivant :  $[0.00009 - 0.002]$ , et nous avons fait des tests en prenant différentes valeurs dans cet intervalle.

Nous avons constaté que dans les premières valeurs le nombre de correction de positions est grand du fait que la distance entre deux positions successive est toujours supérieure à la valeur du seuil ayant une petite valeur, ce qui implique une simulation un peu lente. Malgré que les dernières valeurs de cet intervalle

### 5.3. Évaluation des résultats expérimentaux

---

peuvent nous donner des résultats, mais nous avons remarqué aussi l'augmentation du nombre de corrections de positions, dans ce cas chaque particule se déplace avec une distance plus grande d'une itération à l'autre (cette distance est toujours supérieure au seuil) ce qui nécessite plus de correction de sa position. C'est la raison pour laquelle la dernière valeur de l'intervalle de seuil (0.002) n'a pas pu nous donner de résultats avec 3 itérations de correction de positions (voir figure 5.12).

Valeur de seuil	Nombre de correction de positions
0.00009	257679
0.0001	231274
0.0002	103501
0.0003	64626
0.0004	62259
0.0005	62370
0.0006	70307
0.0007	80079
0.0008	87869
0.0009	115779
0.001	100775
0.0011	115235
0.0012	131249
0.0013	203180
0.0014	191778
0.0015	203566
0.0016	188865
0.0017	183466
0.0018	164158
0.0019	172768
0.002	divergence

TABLE 5.1 – Variation du nombre de correction de positions durant la simulation en fonction de la valeur de seuil

### 5.3. Évaluation des résultats expérimentaux

Les valeurs intermédiaires peuvent assurer un compromis entre rapidité et stabilité de la simulation (voir les valeurs grisées dans la table 5.1).

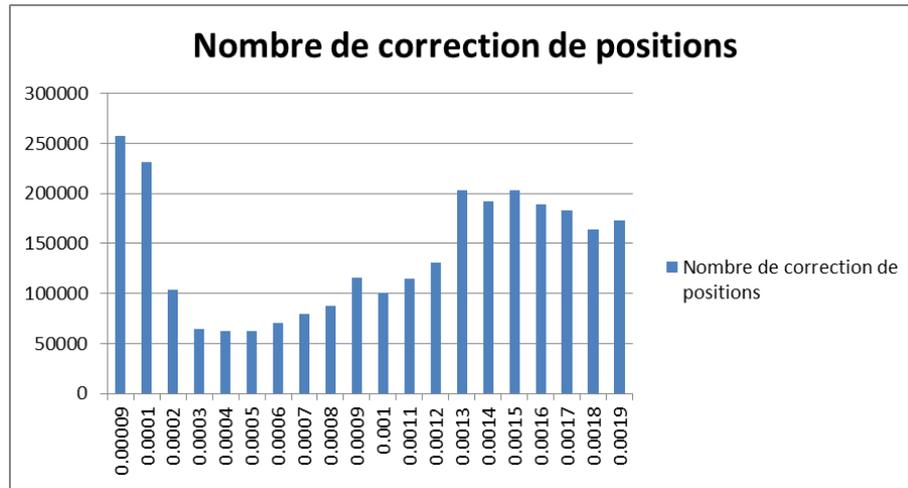


FIGURE 5.13 – Variation du nombre de correction de positions en fonction de la valeur de seuil

### 5.3.5 Critère de subdivision

À ce niveau, le problème était le critère de subdivision c.-à-d. le choix de l'angle  $\alpha$  entre les normales des triangles adjacents à subdiviser. Dans le tableau 5.2 ci-dessous nous donnons les tests qu'on a réalisés avec des angles différents.

Angle	Nombre de subdivisions effectuées	Nombre de subdivisions annulées	Nombre de triangles	Temps (sec)
40°	69180	67491	8254	132
50°	48256	46953	6710	104
60°	33341	32332	5534	65
65°	31591	30627	5354	62
70°	26763	25903	4938	56
75°	22480	21702	4610	55
80°	18539	17807	4426	49
90°	14672	14093	3814	38
100°	11792	11336	3322	34
120°	9861	9485	3002	33
140°	6335	6095	2458	28
160°	2820	2618	2306	28

TABLE 5.2 – Variation des nombres de subdivisions effectuées et annulées et du nombre de triangles selon l'angle de subdivision (tests d'animation d'un Vêtement / Cylindre avec 1000 itérations)

Les résultats obtenus dans le tableau 5.2, montrent que le nombre de subdivisions effectuées et annulées est inversement proportionnel avec l'angle  $\alpha$  considéré. De plus, on peut dire que si l'angle considéré est petit alors aucune subdivision ne paraît utile puisque dans ce cas on va subdiviser même les zones de tissu qui sont suffisamment plates. Aussi, si la valeur de l'angle est trop grande alors le nombre de subdivisions diminue considérablement. Dans ce cas la subdivision ne s'effectue que si la zone du tissu est trop plissée. Pour cela, une valeur moyenne paraît plus intéressante dans notre processus de subdivision (voir les résultats grisés dans le tableau 5.2 ci-dessus). Nous montrons aussi dans le tableau 5.2 ci-dessus que toute diminution de l'angle  $\alpha$  implique l'augmentation du temps d'exécution et des triangles du maillage.

#### 5.3.6 Nombre de niveaux de détails et forme de tissu VS nombre de triangles du maillage

Le nombre des triangles du maillage peut aussi varier selon le nombre de niveaux de détails utilisés. La figure 5.14 illustre la variation du nombre de triangles selon l'angle de subdivision et le nombre de niveaux de détails choisi.

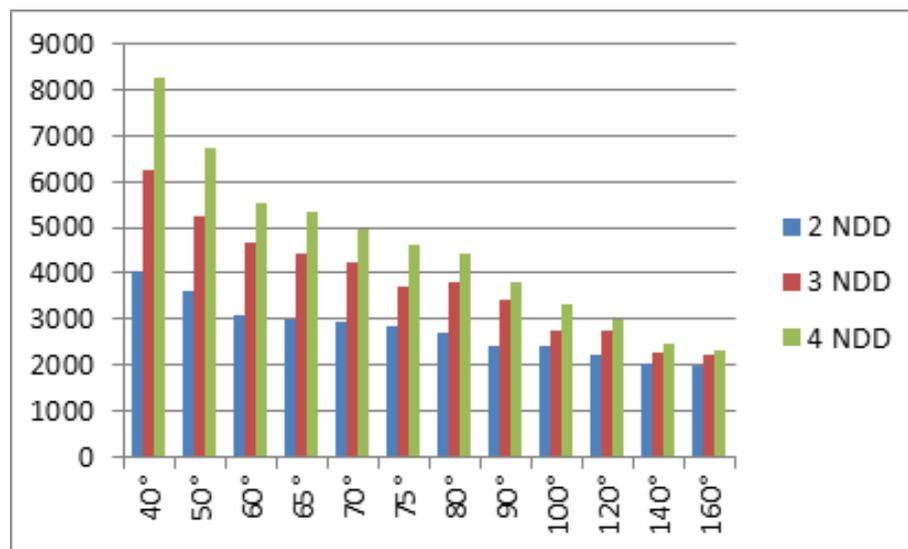


FIGURE 5.14 – La variation du nombre de triangles selon l'angle de subdivision et le nombre de niveaux de détails choisi

De plus, nous montrons dans la figure 5.16 l'animation de pièces de tissu et d'un vêtement. Les deux exemples, tissu/sphère et vêtement/cylindre, nous ont permis de mettre en valeur la forme du tissu. Dans le premier cas, le nombre de triangles reste stable dans les premières itérations du fait que le tissu est représenté par une surface plane. Ceci n'est pas le cas dans le deuxième exemple (vêtement/cylindre), le nombre de triangles augmente dans les premières itérations du fait que le tissu a une forme bien précise au début. Ceci induit la variation des forces, vitesses et positions dès le début (voir figure 5.15).

### 5.3. Évaluation des résultats expérimentaux

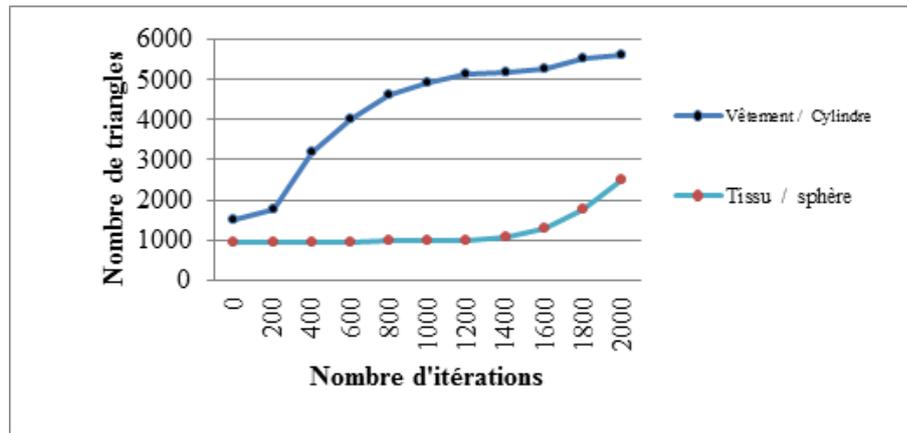


FIGURE 5.15 – Variation du nombre de triangles selon le nombre d'itérations

La figure suivante montre trois étapes de la variation des nombres de triangles au cours de l'animation.

200 itérations		1000 itérations		1600 itérations	
961 Triangles	3 s	969 Triangles	16 s	1313 triangles	26 s
1766 triangles	3 s	4938 Triangles	56 s	5258 triangles	106 s

FIGURE 5.16 – Étapes d'animation d'un tissu qui tombe sur une sphère et d'un vêtement (les triangles subdivisés sont en rouge et les triangles subdivisés et annulés sont en vert)

#### 5.3.7 Résolution du maillage VS temps d'exécution

Les tests expérimentaux illustrés dans cette table nous montrent la variation du temps d'exécution en fonction de la résolution du maillage. Nous avons commencé par une résolution trop détaillée (figure 5.17.1) pour montrer que le temps d'exécution augmente d'une façon exponentielle par rapport à la résolution du

maillage. Dans l'exemple suivant (figure 5.17.2) nous avons essayé de prendre le cas d'animation de tissu avec un basculement dans un seul sens (subdivision sans annulation de subdivision), nous avons remarqué que le temps d'exécution est réduit un peu, mais le nombre de triangles reste un peu grand puisque à chaque subdivision de nouveaux triangles sont générés.

Dans les autres exemples d'implémentation nous avons animé des pièces de tissus avec un basculement dans les deux sens (subdivision et annulation de subdivision). Dans ces tests nous avons constaté que le temps d'exécution de la multi-résolution est important par rapport au temps total. De plus, le temps d'exécution varie selon l'angle de subdivision, si cet angle est suffisamment aigu le nombre de subdivision augmente ce qui implique l'augmentation du nombre triangles et par conséquent le temps d'exécution augmente, dans ce cas la multi-résolution devient inutile. Donc afin de tirer profit de l'approche multi-résolution il faut bien choisir les paramètres du modèle à savoir l'angle de subdivision.

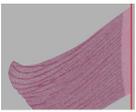
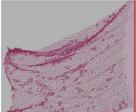
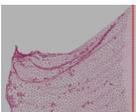
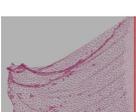
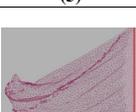
	Nombre de triangles		Nombre de subdivisions		Angle de subdivision	Temps d'exécution (s)	
	Au début	A la fin	effectuées	annulées		de la multi-résolution	total
 (1)	22422	22422	/	/	/	/	280
 (2)	4874	15170	2574		80°	33	140
 (3)	4874	12018	77287	75501	60°	210	320
 (4)	4874	9422	47507	46370	70°	96	182
 (5)	4874	7970	31942	31168	80°	92	178
 (6)	4874	7090	25519	24965	90°	77	154

FIGURE 5.17 – Variation du temps d'exécution en fonction de la résolution du maillage (avec le même nombre d'itérations)

### 5.3.8 Etude comparative

Dans ce paragraphe, nous présentons une comparaison entre nos résultats et les résultats de J. Bender et al. [4]. Rappelons que les simulations dans cette section ont été effectuées sur un PC avec un processeur Intel i5-3470. Dans notre implémentation tous les calculs sont effectués séquentiellement. Dans toutes les simulations, nous avons utilisé au maximum quatre niveaux de détails. Afin de comparer nos résultats avec les résultats de J. Bender [4], nous mentionnons que les auteurs de [4] ont réalisé leur simulation sur un ordinateur portable avec un processeur Intel i7-2860QM. Dans leur mise en œuvre, l'adaptation des masses de sommets et la rigidité, ainsi que le calcul de la courbure moyenne sont effectués en parallèle. Dans toutes les simulations, ils ont utilisé un maximum de six NDD. L'adaptation de maillage est effectuée seulement dans chaque Cinq étape de simulation afin de réduire les coûts de calcul supplémentaires.

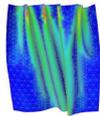
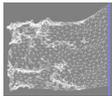
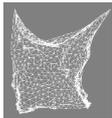
Exemples		Nombre de triangles	Temps de calcul moyen d'une étape de simulation	Facteur d'accélération
	La résolution la plus détaillée	22140	115.9 ms	5.3
	Modèle Adaptif	5158	22.0 ms	
	La résolution la plus détaillée	22140	/	2.4
	Modèle Adaptif	8962	/	
	La résolution la plus détaillée	22422	140.2 ms	9.2
	Modèle Adaptif	3418	15.3 ms	
	La résolution la plus détaillée	22422	141.6 ms	15.7
	Modèle Adaptif	2126	9.1 ms	
	La résolution la plus détaillée	22422	140.0 ms	16.5
	Modèle Adaptif	1570	8.5 ms	

FIGURE 5.18 – Comparaison entre les résultats de J. Bender [4] et nos résultats

Les deux premiers exemples de la figure 5.18 ci-dessus illustrent des exemples de simulation présentés dans le travail de J. Bender [4]. Nous les avons comparés avec trois exemples (les trois suivants) de nos simulations. Sachant que le calcul dans [4] est effectué en parallèle, nous avons remarqué que nos résultats sont plus rapides (voir le facteur d'accélération qui est égale au temps de calcul moyen d'une étape de simulation de la résolution la plus détaillée divisé par celui du modèle adaptatif).

### 5.3.9 Discussion des résultats

D'après les résultats obtenus nous pouvons conclure que la convergence de notre modèle de simulation multi-résolution de tissu/vêtement nécessite :

- L'utilisation des méthodes d'intégration implicite avec un pas de temps très petit.
- La correction des positions des particules si on augmente le pas du temps.
- L'augmentation du nombre d'itérations de la méthode de correction de positions si on utilise une méthode d'intégration explicite.
- L'adaptation du nombre d'itérations de la méthode de correction de positions selon la forme et la position initiale du tissu.
- Un choix adéquat du seuil de la méthode de correction de position.
- Un bon choix de l'angle de subdivision pour la génération des niveaux de détails et pour la réduction du temps d'exécution.

## 5.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté notre modèle de simulation multi-résolution de tissu/vêtement. Nous avons remarqué que l'intégration de la multi-résolution dans notre simulation nous a permis d'améliorer les résultats tout en minimisant le temps de calcul. L'utilisation de la méthode d'intégration implicite en combinaison avec la méthode de correction de positions de particules que nous avons proposée nous a permis de résoudre le problème de la divergence du modèle.

Durant la simulation nous avons constaté que le mouvement de tissu dépend des propriétés physiques de tissu. C'est pourquoi il est difficile de fixer les paramètres du système. Chaque pièce de tissu et chaque forme du vêtement nécessitent des paramètres différents. Néanmoins dans nos simulations, nous avons essayé d'utiliser essentiellement des tissus en coton afin d'étudier les facteurs qui influent sur l'intégration de la multi-résolution à savoir, le nombre de niveaux de détails et la forme de l'objet et le critère de subdivision c'est-à-dire l'angle de subdivision alpha.

## Conclusion générale

**L**A simulation de tissus et de vêtements peut être abordée de plusieurs manières selon le but recherché. Lors de la création d'images de synthèses pour les jeux vidéo, l'objectif est de produire des images réalistes et convaincantes. Dans ce cas, les contraintes physiques sont ignorées ou du moins considérablement simplifiées. En effet, les infographistes préfèrent souvent simplifier le calcul d'une image en simulant "à la main" un mouvement plausible plutôt que de calculer le mouvement réel. En informatique graphique, les recherches se sont plutôt portées sur des simulations basées sur des modèles physiques permettant de restituer un comportement approché du tissu. Les travaux ne tendent pas à reproduire le mouvement exact du textile en fonction de sa matière. Dans d'autres cas, le but est au contraire de préserver les propriétés physiques du textile afin de simuler son comportement réel. Prenons l'exemple de logiciels de CAO pour les industries du textile. Leur objectif est de reproduire le comportement exact d'un tissu selon sa matière. Cela signifie que le tissu doit être modélisé de façon à prendre en compte ses propriétés physiques afin de réussir à simuler ses déformations et ses mouvements au cours du temps [Zar03].

Les modèles physiques permettent de générer des mouvements plus précis et plus réaliste, mais ils sont très couteux en temps de calcul. L'une des solutions proposées dans ce sens est la représentation multi-résolution, c'est-à-dire la génération d'un ensemble de niveaux de détails plus au moins simplifiés selon des critères prédéfinis dépendant de l'application. Dans le cas de la simulation de tissu il s'agit d'utiliser un maillage adaptatif dont les régions détaillées sont représentées par des résolutions plus fines tandis que les régions suffisamment plates sont représentées par des maillages grossiers.

Le but du travail réalisé dans cette thèse est de faire un compromis entre la précision de la simulation et la rapidité de calcul, et ceci en faisant une simulation multi-résolution de vêtements par modèle physique. Pour cela les points suivants ont été abordés :

1. Dans un premier temps, nous avons effectué une étude bibliographique, cette dernière nous a permis de :
  - Faire un diagnostic des aspects déjà traités, dans le domaine de simulation de vêtements que ce soit la modélisation du tissu ou la gestion des

collisions, et ceux nécessitant davantage d'efforts de recherche.

- Faire une description détaillée sur la représentation multi-résolution et son exploitation dans la simulation de tissus et de vêtements, l'étude que nous avons effectuée sur les travaux réalisés dans ce domaine nous a permis de présenter les méthodes et les critères de subdivision implémentés dans ces travaux.
2. Dans une seconde étape, nous avons choisi un modèle physique pour la simulation de tissu. Notre modèle est un croisement entre un modèle basé sur la mécanique des milieux continus (méthode des éléments finis du premier ordre) et un système de particules. Ce modèle permet de faire une simulation plus précise, mais des adaptations sont nécessaires pour assurer la convergence du modèle.
  3. Nous avons donc proposé une méthode de correction des positions des particules et ceci dans le but de limiter le déplacement de chaque particule à chaque itération. Cette méthode nous a permis d'assurer la convergence du modèle. Cependant avec l'utilisation de méthode d'intégration explicite il fallait appliquer la correction de positions de particules plusieurs fois pour éviter la déchirure du tissu.
  4. Afin d'améliorer la qualité du mouvement, nous avons proposé une implémentation efficace de la méthode d'intégration implicite d'Euler. La méthode proposée nous a permis d'éviter les calculs additionnels tels que la résolution d'un grand système linéaire ou l'utilisation du Jacobien.
  5. La dernière étape consistait en l'exploitation de la multi-résolution dans notre modèle de simulation. La réalisation de cette étape nécessite le choix d'une méthode de subdivision et une méthode de simplification ainsi d'un critère de subdivision. Pour la subdivision, nous avons choisi le schéma polyédral du fait qu'il est simple à implémenter et qu'il conserve la forme originale du triangle subdivisé, puisqu'il induit localement un grand nombre de triangles semblables. Pour la simplification, nous avons choisi la méthode d'annulation de subdivision que nous avons proposée dans [3], cette méthode consiste à annuler la subdivision des triangles dans les zones suffisamment plates en suivant le sens inverse de la subdivision polyédrale. Le critère de subdivision consiste à mesurer l'angle entre chaque pair de triangles adjacents.

L'implémentation de la méthode d'Euler implicite en combinaison avec la méthode de correction de positions des particules nous a permis d'obtenir des résultats satisfaisants du fait qu'elle a pu assurer une convergence du modèle. Néanmoins, les résultats obtenus nécessitent des améliorations pour qu'ils soient plus réalistes à savoir :

- L'ajout d'un module pour le traitement de collision avec le corps humain peut augmenter largement le taux de réalisme.
- Une comparaison entre les résultats obtenus, avec des mouvements de tissu réel pris par une caméra par exemple, peut renforcer l'évaluation du système.

- Une comparaison entre le modèle utilisé et le système masse-ressort peut montrer les avantages de l'utilisation de la méthode des éléments finis dans ce genre de système.
- L'ajout d'un module pour le traitement de collision avec le corps humain peut augmenter largement le taux de réalisme.
- Une comparaison entre les résultats obtenus, avec des mouvements de tissu réel pris par une caméra par exemple, peut renforcer l'évaluation du système.
- Une comparaison entre le modèle utilisé et le système masse-ressort peut montrer les avantages de l'utilisation de la méthode des éléments finis dans ce genre de système.
- L'habillage des tissus animés par des textures pour qu'ils apparaissent plus réalistes. Dans ce cas le temps d'exécution est un facteur important, pour cela un effort doit être fourni au niveau algorithmique afin d'exploiter le parallélisme massif des GPU.

# Bibliographie

- [1] HeeJung Bae, Kwyang Woo Ryu, and ByungTae Jang. Procedural approach to generate real time motions of cloth. In *Shape Modeling International, 2002. Proceedings*, pages 213–217. IEEE, 2002.
- [2] David Baraff and Andrew Witkin. Large steps in cloth simulation. In *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 43–54. ACM, 1998.
- [3] Sabrina Benameur and NourEddine Djedi. Intégration de la multirésolution dans un système masse-ressort : Application à l’animation de tissu. *TAIMA’05*, pages 495–500, 2005.
- [4] Jan Bender and Crispin Deul. Efficient cloth simulation using an adaptive finite element method. In *VRIPHYS*, pages 21–30, 2012.
- [5] Jan Bender, Daniel Weber, and Raphael Diziol. Fast and stable cloth simulation based on multi-resolution shape matching. *Computers & Graphics*, 37(8) :945–954, 2013.
- [6] Fernando Birra and Manuel Santos. Towards efficiency in cloth simulation. In *International Conference on Articulated Motion and Deformable Objects*, pages 144–155. Springer, 2008.
- [7] David E. Breen, Donald H. House, and Gettoauthor Phillip H. A physical-based particle model of woven cloth. *The Visual Computer*, 8(5,6) :264–275, 1992.
- [8] David E Breen, Donald H House, and Michael J Wozny. A particle-based model for simulating the draping behavior of woven cloth. *Textile Research Journal*, 64(11) :663–685, 1994.
- [9] Robert Bridson, Ronald Fedkiw, and John Anderson. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation. *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, 21(3) :594–603, 2002.
- [10] Robert Bridson, Sebastian Marino, and Ronald Fedkiw. Simulation of clothing with folds and wrinkles. In *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pages 28–36. Eurographics Association, 2003.

- [11] Tyson Brochu, Essex Edwards, and Robert Bridson. Efficient geometrically exact continuous collision detection. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 31(4) :96, 2012.
- [12] Pierre-Yves Burgy. Intégration de la multi-résolution dans un système de déformation masseressort. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, 2000.
- [13] Marie-Paule Cani, Caroline Larboulette, Nadia Magnenat-Thalmann, and Pascal Volino. Les techniques d’habillage : peau, vêtements et chevelures. In *Le traité de la Réalité Virtuelle, Les humains virtuels*, volume 5, chapter 8, pages 161–182. Presse de l’Ecole des Mines de Paris, 2009.
- [14] Michel Carignan, Ying Yang, Nadia Magnenat Thalmann, and Daniel Thalmann. Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. In *ACM Siggraph Computer Graphics*, volume 26, pages 99–104. ACM, 1992.
- [15] Hatem Charfi. *Amélioration de la modélisation et de la simulation des vêtements en 3D*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2006.
- [16] Chiyi Cheng, Ying-Qing Xu, Jiaoying Shi, and Heung-Yeung Shum. Physically based real-time animation of hangings. In *Proc. of Computer Graphics International*, pages 257–264. Citeseer, 2001.
- [17] Kwang-Jin Choi and Hyeong-Seok Ko. Research problems in clothing simulation. *Computer-aided design*, 37(6) :585–592, 2005.
- [18] Kwang-Jin Choi and Hyeong-Seok Ko. Stable but responsive cloth. In *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, page 1. ACM, 2005.
- [19] Zoran Constantinescu. Levels of detail : An overview. *Nonlinear Analysis : Modelling and Control (5)*, pages 39–52, 2001.
- [20] Frédéric Cordier. *Real-time animation of dressed virtual humans*. PhD thesis, University of Geneva, 2004.
- [21] Frederic Cordier and Nadia Magnenat-Thalmann. Real-time animation of dressed virtual humans. In *Computer Graphics Forum*, volume 21, pages 327–335. Wiley Online Library, 2002.
- [22] Frederic Cordier and Nadia Magnenat-Thalmann. Real-time animation of dressed virtual humans. In *Computer Graphics Forum*, volume 21, pages 327–335. Wiley Online Library, 2002.
- [23] Frederic Cordier, Hyewon Seo, and Nadia Magnenat-Thalmann. Made-to-measure technologies for an online clothing store. *IEEE Computer graphics and applications*, 23(1) :38–48, 2003.
- [24] Gilles Debunne. *Animation multirésolution d’objets déformables en temps-réel. Application à la simulation chirurgicale*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2000.
- [25] Sébastien Delest. *Segmentation de maillages 3D à l’aide de méthodes basées sur la ligne de partage des eaux*. PhD thesis, Université François Rabelais-Tours, 2007.

- [26] Mathieu Desbrun, Peter Schröder, and Alan Barr. Interactive animation of structured deformable objects. In *Graphics Interface*, volume 99, page 10, 1999.
- [27] Bernhard Eberhardt, Olaf Eitzmuß, and Michael Hauth. *Implicit-explicit schemes for fast animation with particle systems*. Springer Vienna, 2000.
- [28] Bernhard Eberhardt, Andreas Weber, and Wolfgang Strasser. A fast, flexible, particle-system model for cloth draping. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 16(5) :52–59, 1996.
- [29] Olaf Eitzmuss, Joachim Gross, and Wolfgang Strasser. Deriving a particle system from continuum mechanics for the animation of deformable objects. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 9(4) :538–550, 2003.
- [30] Olaf Eitzmuß, Michael Keckeisen, and Wolfgang Straßer. A fast finite element solution for cloth modelling. In *Computer Graphics and Applications, 2003. Proceedings. 11th Pacific Conference on*, pages 244–251. IEEE, 2003.
- [31] François Faure. *Deux problèmes physiques pour la synthèse d'images*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 1997.
- [32] François Faure. Simulation physique interactive pour la synthèse d'images. *Habilitation à Diriger des Recherches, Université Joseph-Fourier-Grenoble I*, 2008.
- [33] Carl Richard Feynman. *Modeling the appearance of cloth*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1986.
- [34] Arnulph Fuhrmann, Clemens Groß, and Volker Luckas. Interactive animation of cloth including self collision detection. In *WSCG*, 2003.
- [35] Michael Garland. *Quadric-based polygonal surface simplification*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 1999.
- [36] Naga K Govindaraju, Stephane Redon, Ming C Lin, and Dinesh Manocha. Cullide : Interactive collision detection between complex models in large environments using graphics hardware. In *Proceedings of the ACM SIG-GRAPH/EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware*, pages 25–32. Eurographics Association, 2003.
- [37] BK Hinds and J McCartney. Interactive garment design. *The Visual Computer*, 6(2) :53–61, 1990.
- [38] Dave Hutchinson, Martin Preston, and Terry Hewitt. Adaptive refinement for mass/spring simulations. In *Computer Animation and Simulation 96*, pages 31–45. Springer, 1996.
- [39] Ammar Joukhadar. *Simulation dynamique et applications robotiques*. PhD thesis, INRIA, 1996.

- [40] Young-Min Kang, Jeong-Hyeon Choi, Hwan-Gue Cho, and Do-Hoon Lee. An efficient animation of wrinkled cloth with approximate implicit integration. *The Visual Computer*, 17(3) :147–157, 2001.
- [41] Young-Min Kang, Jeong-Hyeon Choi, Hwan-Gue Cho, Do-Hoon Lee, and Chan-Jong Park. Interactive animation of mass-spring based flexible objects. *DRAFT VERSION*, 2001.
- [42] James T Klosowski, Martin Held, Joseph SB Mitchell, Henry Sowizral, and Karel Zikan. Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-dops. *IEEE transactions on Visualization and Computer Graphics*, 4(1) :21–36, 1998.
- [43] Michael Krus. *Connexion et Facettisation : Gestion Adaptative des Scènes Virtuelles Application aux Environnements Industriels*. PhD thesis, 1999.
- [44] Mike Krus. Maillages polygonaux et niveaux de détails : étude bibliographique. *RR 97*, 10, 1997.
- [45] Michelle Laprade. *Traitement interactif de plis dans la simulation de tissus*. PhD thesis, Université de Montréal, 2007.
- [46] Thomas Larsson and Tomas Akenine-Möller. A dynamic bounding volume hierarchy for generalized collision detection. *Computers & Graphics*, 30(3) :450–459, 2006.
- [47] Tung Le Thanh and André Gagalowicz. Virtual cloth pre-positioning. In *Proceedings of Mirage 2005*, 2005.
- [48] Tung Le Thanh and André Gagalowicz. Fast virtual cloth energy minimization. In *International Conference on Computer Vision / Computer Graphics Collaboration Techniques and Applications*, pages 139–149. Springer, 2007.
- [49] Aaron WF Lee, Wim Sweldens, Peter Schröder, Lawrence C Cowsar, and David Dobkin. Multiresolution adaptive parameterization of surfaces. In *SIGGRAPH 98 :Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 95–104. Orlando, USA, 1998.
- [50] Yongjoon Lee, Sung-eui Yoon, Seungwoo Oh, Duksu Kim, and Sunghee Choi. Multi-resolution cloth simulation. In *Computer Graphics Forum*, volume 29, pages 2225–2232. Wiley Online Library, 2010.
- [51] Ling Li and Vasily Volkov. Cloth animation with adaptively refined meshes. In *Proceedings of the Twenty-eighth Australasian conference on Computer Science-Volume 38*, pages 107–113. Australian Computer Society, Inc., 2005.
- [52] Jean Louchet, Xavier Provot, and David Crochemore. Evolutionary identification of cloth animation models. In *Computer Animation and Simulation 95*, pages 44–54. Springer, 1995.
- [53] David P Luebke. A developer’s survey of polygonal simplification algorithms. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(3) :24–35, 2001.

- [54] Christiane Luible and Nadia Magnenat-Thalmann. The simulation of cloth using accurate physical parameters. *CGIM 2008, Innsbruck, Austria*, 2008.
- [55] Nadia Magnenat-Thalmann. *Modeling and simulating bodies and garments*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [56] Nadia Magnenat-Thalmann and Pascal Volino. From early draping to haute couture models : 20 years of research. *The Visual Computer*, 21(8) :506–519, 2005.
- [57] William A McNeely, Kevin D Puterbaugh, and James J Troy. Six degree-of-freedom haptic rendering using voxel sampling. In *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, page 42. ACM, 2005.
- [58] P Meseure, A Kheddar, and F Faure. Détection des collisions et calcul de la réponse. *Action Spécifique DdC du CNRS, Tech. Rep*, 2003.
- [59] Philippe Meseure. *Modélisation de corps déformables pour la simulation d'actes chirurgicaux*. PhD thesis, 1997.
- [60] Mark Meyer, Gilles Debunne, Mathieu Desbrun, and Alan H Barr. Interactive animation of cloth-like objects in virtual reality. *Journal of Visualization and Computer Animation*, 12(1) :1–12, 2001.
- [61] Johannes Mezger, Stefan Kimmerle, and Olaf Eitzmuß. Improved collision detection and response techniques for cloth animation. 2002.
- [62] Olivier Nocent. Animation réaliste de textiles. *5èmes journées AFIG*, pages 227–235, 1997.
- [63] Olivier Nocent. *Animation dynamique de corps déformables continus : application à la simulation de textiles tricotés*. PhD thesis, 2001.
- [64] Olivier NOCENT, Jean-Michel NOURRIT, and Yannick REMION. Vers du niveau de détail mécanique pour l'animation dynamique d'objets continus. application aux textiles tricotés. *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique*, 16(1) :115–130, 2001.
- [65] J-M Nourrit, Eric Desjardin, and C Secroun. Modélisation de textiles à base de mailles. *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique*, 12(4) :373–385, 1997.
- [66] SW Oh, HS Kim, and Kwangyun Wohn. Collision handling for interactive garment simulation. In *Eighth international conference on virtual systems and multimedia*, volume 2, pages 239–251, 2002.
- [67] Takashi Ohta. Use of multiple representations for simulating cloth shapes and motions : An overview. *IBM Journal of Research and Development*, 39(5) :523–530, 1995.
- [68] Masaki Oshita and Akifumi Makinouchi. Real-time cloth simulation with sparse particles and curved faces. In *Computer Animation, 2001. The Fourteenth Conference on Computer Animation. Proceedings*, pages 220–227. IEEE, 2001.

- [69] Miguel A Otaduy, Olivier Chassot, Denis Steinemann, and Markus Gross. Balanced hierarchies for collision detection between fracturing objects. In *Virtual Reality Conference, 2007. VR'07. IEEE*, pages 83–90. IEEE, 2007.
- [70] Xavier Provat. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behaviour. In *Graphics interface*, pages 147–147. Canadian Information Processing Society, 1995.
- [71] Xavier Provat. Animation réaliste de vêtements. In *Cinquième séminaire du groupe de travail "Animation et Simulation"*, pages 75–91. GDR-PRC AMI, Reims, 1997.
- [72] Isaac Rudomín and M Meln. Multi-layer garments using hybrid models. *Visual 2000 Proceedings*, pages 118–128, 2000.
- [73] Brian Sharp. Subdivision surface theory. *Game Developer*, 7(1) :34–42, 2000.
- [74] Min Shi, Tian-Lu Mao, and Zhao-Qi Wang. Multi-resolution cloth based on animation instances. *Chinese Journal of Computers*, 2015.
- [75] Mikio Shinya and Marie-Claire Forgue. Interference detection through rasterization. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2(4) :132–134, 1991.
- [76] El Hassane Taibi. *Caractérisation, Modélisation et simulation du comportement d'un tissu textile*. PhD thesis, Bordeaux 1, 2001.
- [77] Demetri Terzopoulos, John Platt, Alan Barr, and Kurt Fleischer. Elastically deformable models. In *ACM Siggraph Computer Graphics*, volume 21, pages 205–214. ACM, 1987.
- [78] Matthias Teschner, Bruno Heidelberger, Matthias Müller, Danat Pomerantes, and Markus H Gross. Optimized spatial hashing for collision detection of deformable objects. In *Vmv*, volume 3, pages 47–54, 2003.
- [79] Bernard Valton. *Gestion de la complexité de scènes animées et interactives : contributions à la conception et à la représentation*. PhD thesis, 1999.
- [80] Tzvetomir Vassilev, Bernhard Spanlang, and Yiorgos Chrysanthou. Fast cloth animation on walking avatars. In *Computer Graphics Forum*, volume 20, pages 260–267. Wiley Online Library, 2001.
- [81] Tzvetomir I Vassilev. Dressing virtual people. In *SCI2000 conference, Orlando*, pages 23–26, 2000.
- [82] Julien Villard and Houman Borouchaki. Adaptive meshing for cloth animation. *Engineering with Computers*, 20(4) :333–341, 2005.
- [83] Pascal Volino, Frederic Cordier, and Nadia Magnenat-Thalmann. From early virtual garment simulation to interactive fashion design. *Computer-aided design*, 37(6) :593–608, 2005.

- [84] Pascal Volino, Martin Courchesne, and Nadia Magnenat Thalmann. Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects. In *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 137–144. ACM, 1995.
- [85] Pascal Volino and N Magnenat-Thalmann. *Virtual clothing : Theory and practice*. 2000. Springer Verlag, 2012.
- [86] Pascal Volino and Nadia Magnenat-Thalmann. Implicit midpoint integration and adaptive damping for efficient cloth simulation. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 16(3-4) :163–175, 2005.
- [87] Pascal Volino and Nadia Magnenat-Thalmann. Simple linear bending stiffness in particle systems. In *Proceedings of the 2006 ACM SIG-GRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pages 101–105. Eurographics Association, 2006.
- [88] Pascal Volino, Nadia Magnenat-Thalmann, and Francois Faure. A simple approach to nonlinear tensile stiffness for accurate cloth simulation. *ACM Transactions on Graphics*, 28(4) :Article–No, 2009.
- [89] Pascal Volino and N Magnenat Thalmann. Implementing fast cloth simulation with collision response. In *Computer Graphics International, 2000. Proceedings*, pages 257–266. IEEE, 2000.
- [90] Pascal Volino and Nadia Magnenat Thalmann. Collision and self-collision detection : Efficient and robust solutions for highly deformable surfaces. In *Computer Animation and Simulation'95*, pages 55–65. Springer, 1995.
- [91] Pascal Volino and Nadia Magnenat Thalmann. Developing simulation techniques for an interactive clothing system. In *Virtual Systems and MultiMedia, 1997. VSMM'97. Proceedings., International Conference on*, pages 109–118. IEEE, 1997.
- [92] Charlie CL Wang, Yu Wang, and Matthew MF Yuen. Feature based 3d garment design through 2d sketches. *Computer-Aided Design*, 35(7) :659–672, 2003.
- [93] Jerry Weil. The synthesis of cloth objects. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 20(4) :49–54, 1986.
- [94] Florence Zara. Simulation physique de textiles sur grappe de processeurs. In *14èmes Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique (AFIG'01)*, 2001.
- [95] Florence Zara. *Algorithmes parallèles de simulation physique pour la synthèse d'images : application à l'animation de textiles*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2003.
- [96] Dongliang Zhang and Matthew Ming-Fai Yuen. Collision detection for clothed human animation. In *Computer Graphics and Applications, 2000. Proceedings. The Eighth Pacific Conference on*, pages 328–337. IEEE, 2000.

# Publications et Communications

Les publications et les communications relatives à cette thèse sont les suivantes :

## Publications

1. S. BENAMEUR, N. DJEDI, Une méthode d'intégration efficace pour la simulation de tissus par un modèle physique. *Courrier du Savoir*, volume 22, numéro 1, page 187-194, janvier 2017.
2. S. BENAMEUR, N. DJEDI, Mutli-resolution Cloth Simulation based on Particle PositionCorrection. *International Journal of Computer Applications, Foundation of Computer Science (FCS), NY, USA*, volume 143, numéro 6, pages 29-36, juin 2016

## Communications

1. S. BENAMEUR, N. DJEDI, La Simulation de Vêtements: Etat de l'art et perspectives de recherche, *6ème séminaire National en Informatique de Biskra SNIB'08*, Biskra Algérie, mai 2008.
2. S. BENAMEUR, N. DJEDI, Les Problèmes de Recherche dans la Simulation de Vêtements. *3ème Journées Internationales sur l'informatique graphique, JIG'2007*, Constantine Algérie, 2007

