كلية العلوم و التقنيات فاس
ⵜⴰⵖⵚⵓⵍⵜ ⵏ ⵜⵇⴰⵙⵙⴰⵙⵉⵏ ⴷ ⵜⵙⵙⵜⵙⵉⵏ
Faculté des Sciences et Techniques de Fès

جامعة سيدي محمد بن عبد الله
ⵜⴰⵙⴷⴰⵡⵜ ⵙⵉⴷⵉ ⵎⵓⵃⴰⵎⴻⴷ ⴱⵏ ⵄⴱⴷⵍⵍⴰⵀ
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

N° d'ordre 65 /2021

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mr : ABDERRAZZAK AIT MOUHOU

Spécialité : informatique

Sujet de la thèse : **Nouvelles approches pour la modélisation et la déformation des caractéristiques des surfaces en mouvement d'un objet 3D : Application aux personnages virtuels**

Thèse présentée et soutenue le mercredi 28 juillet 2021 devant le jury composé de :

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
Khalid SATORI	PES	Faculté des Sciences Dhar El Mehraz de Fès	Président
Abderrahim EL QADI	PES	Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Rabat	Rapporteur
El Hassan SBAI	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Meknès	Rapporteur
Ismail AKHARRAZ	PH	Faculté Polydisciplinaire de Taza	Rapporteur
El Bachir TAZI	PH	Faculté Polydisciplinaire de Taza	Examinateur
Khalid ABBAD	PH	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examinateur
Majid BEN YAKHLEF Abderrahim SAAIDI	PES PH	Faculté Polydisciplinaire de Taza, USMBA Faculté Polydisciplinaire de Taza, USMBA	Directeurs de thèse

Laboratoire d'accueil : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur (LSI)

Etablissement : Faculté Polydisciplinaire de Taza

Résumé

Réaliser une déformation visuellement plausible d'un objet 3D, comme par exemple un modèle du corps humain et les vêtements, est une étape importante dans le processus d'animation, que ce soit pour des productions de jeux vidéo ou de films d'animation 3D. Parmi les méthodes les plus utilisées on trouve les déformations géométriques rapides telles que l'enrobage (skinning) et les méthodes physiques à basse résolution. Cependant, ces méthodes ne permettent pas de simuler certains aspects naturels et essentiels de la surface de l'objet. En particulier la préservation du volume du corps, l'effet du gonflement de la peau au niveau des articulations de la main virtuelle, le positionnement sans pénétrations d'un vêtement sur le corps d'un personnage, ou la création de plis sur la surface des vêtements portés par un personnage animé.

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le cadre de modélisation et déformation des modèles 3D. De nouvelles méthodes de déformation de tissu (vêtement et peau) ont été proposées. Ces méthodes permettent de rendre la surface des modèles plus active et réaliste, en modélisant un certain nombre de contraintes de la surface portant sur les caractéristiques du volume ou sur les détails intrinsèques de celle-ci.

Les principales contributions proposées dans cette thèse sont :

- Premièrement, nous avons proposé une nouvelle méthode de génération de plis pour des vêtements portés par un personnage. Nous avons utilisé pour cela une déformation du maillage du vêtement à l'aide d'une représentation implicite basée sur les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF). Le processus de génération de plis est effectué avec des courbes tracées dans les régions qui présentent une forte déformation du maillage.
- Deuxièmement, nous avons proposé une méthode de positionnement de vêtements sur des modèles de corps humain ayant différentes formes et postures. Cette méthode ne nécessite aucun modèle de référence et elle est basée sur l'idée d'établir une correspondance entre le corps humain et le maillage du vêtement. Cette correspondance est réalisée avec la déformation du vêtement basée sur l'approximation des fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF).
- Troisièmement, nous avons proposé une méthode de déformation implicite basée sur le suivi du maillage à l'aide des formes volumétriques. Cette contribution a pour objectif de surmonter les défauts de l'enrobage standard (LBS et DQS), en ajoutant une étape de post-traitement qui consiste à corriger les positions des sommets du maillage déformé. La correction des positions est effectuée à l'aide des formes volumétriques considérées comme guides de déformation.

Nos différentes approches ont été évaluées à l'aide des simulations détaillées avec différents modèles, scènes d'animation, et comparaisons avec d'autres méthodes. Les avantages de ces approches dans le domaine de modélisation et de déformation sont multiples et bien dégagés, et les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Mots clés : Simulation du vêtement, Positionnement du vêtement, Système d'essayage virtuel, Modélisation implicite, Déformation par squelette, Animation de personnages, Déformation implicite, Modélisation de plis.

Abstract

Performing a visually plausible deformation of a 3D object, such as a human body model and clothing, is an important step in the animation process, whether for video game productions or 3D animated movies. Among the most commonly used methods are geometric deformations such as skinning and low-resolution physical methods. However, these methods do not allow the simulation of some natural and essential aspects of the object surface. In particular, the preservation of body volume, the effect of skin swelling at the joints, the positioning without penetrations of a garment on the character's body, or the creation of wrinkles on the surface of clothing worn by an animated character.

The present work is related to the modeling and deformation of 3D objects. New methods of deformation of the fabric (clothing and skin) have been proposed. Our methods allow to make the surface of the models more active and realistic, by modeling a number of constraints of the surface in relation with the characteristics of the volume or the intrinsic details of the surface.

The main contributions proposed in this thesis are:

– First, we have proposed a new method for generating wrinkles for clothes worn by a character. For this purpose, we used a deformation of the mesh of the garment using an implicit representation based on Hermite radial basis functions (HRBF). The process of generating folds is performed with curves drawn in regions that exhibit high mesh deformation.
– Second, we have proposed a method for positioning garments on human body models with different shapes and postures. This method which doesn't require any reference model is based on the idea of establishing a correspondence between the human body and the garment mesh. This correspondence is performed with the deformation of the garment based on the Hermite Radial Basis Function approximation (HRBF).
– Third, we have proposed an implicit deformation method based on mesh tracking using volumetric shapes. This contribution aims at overcoming the shortcomings of the standard embedding (LBS and DQS), by adding a post-processing step that consists in correcting the positions of the vertices of the deformed mesh. The correction of the positions is performed using the volumetric shapes considered as deformation guides.

Our different approaches have been evaluated using detailed simulations with different models, animation scenes, and comparisons with other methods are accomplished. The advantages of these approaches in the field of modeling and deformation are multiple and well identified. Thus, the results obtained are very satisfactory.

Keywords: Garment simulation, Garment positioning, Virtual fitting system, Implicit modeling, Skeleton deformation, Character animation, Implicit deformation, Wrinkles modeling.

Table des matières

Résumé 1

Abstract 3

Table des matières 4

Liste des figures 7

Liste des tableaux 11

Liste des abréviations 12

Introduction générale 13

Chapitre 1 : État de l'art 19

1.1. Introduction 19

1.2. Modélisation par surfaces 19

1.2.1. Surfaces explicites 20

1.2.2. Surfaces implicites 28

1.3. Déformation physique 32

1.3.1. Modèle à masses-ressorts 32

1.3.2. Animation physique de vêtements 34

1.4. Déformations géométriques 35

1.4.1. Classification des méthodes géométriques 36

1.4.2. Déformations de l'espace 36

1.4.3. Déformation par enrobage (alias Skinning) 39

1.4.4. Déformations à base de modèles 48

1.4.5. Déformation directe de surfaces 51

1.5. Déformation sous contraintes 53

1.5.1. Contraintes de longueurs 54

1.5.2. Préservation de volume 62

1.6. Conclusion 64

Chapitre 2 : Nouvelle méthode de synthèse de plis sur un maillage de tissu à l'aide des fonctions à base radiale d'Hermite 65

2.1. Introduction 65

2.2. Principe général de l'approche d'ajout de plis 66

2.3. Déformation implicite de vêtements 68

2.3.1. Partitionnement du vêtement 68

2.3.2. Approximation du maillage de vêtement 70

2.3.3. Déformation de vêtements 79

2.4. Génération de plis 82
2.4.1. Préparation des champs d'angles 83
2.4.2. Génération des courbes de plis 84
2.4.3. Principe du mouvement des plis 87
2.4.4. Génération de la forme géométrique de plis 88
2.4.5. Projection des plis sur le maillage du vêtement 89
2.5. Résultats expérimentaux 92
2.5.1. Performances de calcul 92
2.5.2. Évaluation qualitative de la méthode d'ajout de plis 94
2.5.3. Comparaison et discussion 100
2.6. Conclusion 107
Chapitre 3 : Positionnement de vêtements 3D sur un corps humain à l'aide de squelette d'animation et des fonctions à base radiale d'Hermite 108
3.1. Introduction 108
3.2. Aperçu général sur la méthode de positionnement 109
3.3. Intégration du squelette dans les maillages 112
3.4. Alignement de la posture du vêtement avec celle du corps 113
3.4.1. Alignement des squelettes 114
3.4.2. Déformation de vêtement 116
3.5. Transfert de vêtement 117
3.5.1. Ajustement de l'orientation du vêtement 117
3.5.2. Gestion des pénétrations 120
3.5.3. Apparence du vêtement 121
3.6. Résultats et validation 122
3.6.1. Résultats des simulations 123
3.6.2. Comparaison avec les approches alternatives 129
3.7. Performances d'exécution 134
3.8. Conclusion 136
Chapitre 4 : Nouvelle méthode de déformation à base des formes volumétriques (DBVS) - Application au maillage de main virtuelle 137
4.1. Introduction 137
4.2. Calcul du poids d'enrobage 139
4.3. Principe général de la méthode DBVS 139
4.4. Déformation du maillage 142
4.4.1. Création de la forme volumétrique 142

4.4.2. Support compact de la forme volumétrique 145
4.4.3. Composition des fonctions de distance 147
4.4.4. Suivi du maillage 150
4.4.5. Algorithme de déplacement des sommets 153
4.5. Résultats de simulation 154
4.6. Performances de calcul 157
4.7. Paramètres du contrôle de la déformation 158
4.8. Comparaison de DBVS avec les méthodes alternatives 160
4.9. Conclusion 164
Conclusion générale 165
5. **Annexe A** 176
6. Annexe B 186
7. Annexe C 188

Liste des figures

Figure 1-1 : Modèle 3D d'un lapin ; (a) maillage triangulaire ; (b) le modèle affiché sur l'écran..... 20
Figure 1-2 : Exemple de transformation du plan 2D en surface 3D 21
Figure 1-3 : Exemple de surface définie par morceaux à partir d'un même domaine 23
Figure 1-4 : Différents exemples de courbes splines générées à partir des mêmes points de contrôle : (a)-spline d'interpolation ; (b)-B-spline ; (c)-spline cubique fermée ; (d)-B-spline cubique fermée 24
Figure 1-5 : Schéma de subdivision de Catmull-Clark 27
Figure 1-6 : Schéma de subdivision de Doo-Sabin 28
Figure 1-7 : Schéma de subdivision de Loop 28
Figure 1-8 : Exemple de squelette d'animation formé par une structure hiérarchiques de repères 39
Figure 1-9 : Exemple de déformation par enrobage lisse 41
Figure 1-10 : Exemple de l'effet de "collapsing elbow" indiqué par les cercles rouges 42
Figure 1-11 : Déformation d'un modèle de cylindre en utilisant méthode du LBS..... 43
Figure 1-12 : Exemple de correction de déformation LBS..... 44
Figure 1-13 : Résultats de déformation ; (a) Enrobage LBS ; (b) Enrobage par quaternions doubles 45
Figure 1-14 : Exemple du maillage du vêtement déformé en utilisant des repères non hiérarchiques..... 46
Figure 1-15 : Main virtuelle déformée par enrobage avec une distribution des poids non appropriés..... 47
Figure 1-16 : Illustration de diffusion de poids d'enrobage par équation de la chaleur sur un cylindre ; Exemple issu de la proposition de [16] 48
Figure 1-17 : Résultats de méthode d'apprentissage proposée par [151] appliquée sur des caractères animés 50
Figure 1-18 : Exemple de processus de subdivision du maillage polygonal..... 52
Figure 1-19 : Illustration de déformation basée sur les coordonnées différentielles [132] 53
Figure 1-20 : Modèles de vêtements virtuels utilisés en production cinématographique et jeux vidéo ; (À gauche) image issue de film d'animation Tangled [133] ; (À droite) image issue de jeu vidéo Assassin's Creed Syndicate [159] 54
Figure 1-21 : Transformation d'une courbe dans le plan en courbe dans la surface de vêtement 55
Figure 1-22 : Simulation quasi inextensible de deux modèles de vêtements [52] 58
Figure 1-23 : Simulation de vêtements à l'aide de frottement coulombien exact [90] 59
Figure 1-24 : Déformation par optimisation d'un modèle de jupe [33]..... 60
Figure 1-25 : Plis simulés sur deux modèles de vêtement ; (a) Exemple issu de [40] ; (b) Exemple issu de [80] 61
Figure 1-26 : Exemple de courbe de plis dessinés manuellement sur la surface du vêtement [39]..... 62
Figure 1-27 : Exemple de préservation de volume par déformation Laplacienne volumique [158] 63
Figure 2-1 : Principe de la méthode d'ajout de plis à un vêtement porté par un personnage animé ; (a) partitionnement du maillage ; (b) l'approximation HRBF ; (c) déformation du maillage 67
Figure 2-2 : Partitionnement de modèles de vêtements ; (a) Maillages avec squelette ; (b) les partitions des maillages résultants 69
Figure 2-3 : Exemple d'approximation en HRBF du maillage de pantalon..... 70
Figure 2-4 : Distribution de point de contrôle sur la surface d'un partie i du maillage 71
Figure 2-5 : Tracé de la fonction de re-paramétrisation 73
Figure 2-6 : Approximation des segments de vêtements ; (a) champs de potentiel HRBF ; (b) surfaces implicites résultantes 74

Figure 2-7 : Remplissage des trous laissés par l'étape de partitionnement ; (a) point de contrôle supplémentaire en bleu ; (b) la surface implicite finale reconstruite 75
Figure 2-8 : Calcul de l'angle α à partir de l'angle entre les os associés aux champs. 76
Figure 2-9 : Coupe transversale du champ généré par la composition des deux champs constituants la partie de genou ; (a) et (c) le résultat de composition avec l'opérateur d'union ; (b) le résultat de composition avec l'opérateur de mélange lisse 78
Figure 2-10 : Exemple de déformation de trois modèles de vêtement ; (a) positionnement de squelette d'animation ; (b) Le champ potentiel global obtenu après la transformation ; (c) la déformation de vêtement 80
Figure 2-11 : Exemple de correction des positions de sommet effectuée à l'aide du processus de suivi .. 81
Figure 2-12 : Exemple de relaxation tangentielle 82
Figure 2-13 : Exemple des angles de gradient dans l'intersection de deux champs HRBF 84
Figure 2-14 : (a) en rouge l'intersection des deux champs ; (b) en bleu les courbes de plis ; en vert les points de départ de traçage des courbes 85
Figure 2-15 : Principe du mouvement de courbe de plis ; La courbes vert et bleu sont respectivement les courbe de plis à l'instant précédente et courante ; Le point rouge représente un exemple de mouvement de point générateur 88
Figure 2-16 : Plis générés ; (a) maillage du vêtement déformé ; (b) maillage après l'étape de projection ; (c) zoom sur les plis ajoutés 90
Figure 2-17 : Maillage final obtenu à la fin d'application du lissage 91
Figure 2-18 : Résultats de plissement de deux modèles serrés portés par un personnage pendant deux poses d'animation 95
Figure 2-19 : Résultat d'ajout de plis sur un modèle de robe ; (a) modèle initial ; (b) modèle déformé ; (c) maillage avec des plis et (d) Modèle final 96
Figure 2-20 : Résultats d'ajout de plis pour un modèle de pantalon avec (a) $\tau = 0.8$ et (b) $\tau = 0.4$ 97
Figure 2-21 : Résultats d'ajout de plis pour un modèle de pantalon avec (a) $\gamma = 75$ et (b) $\gamma = 117$ 98
Figure 2-22 : Résultats d'ajout de plis sur trois résolutions d'un modèle de chemise ample ; Les statistiques représentent respectivement ; les sommets et les faces du maillage de chaque chemise 99
Figure 2-23 : Résultat d'animation d'un vêtement porté par un personnage pendant trois trames d'animation. 100
Figure 2-24 : Comparaison de nos résultats (a) avec deux méthodes de simulation physique (b) [108] et (c) [90] 103
Figure 2-25 : Comparaison avec la méthode de [55] ; (a) Résultats de [55] ; (b) Résultats de simulation avec la méthode d'ajout de plis 104
Figure 2-26 : Comparaison entre la méthode d'ajout de plis (a) et la méthode basée sur des croquis de Wang et al. [150] (b) 105
Figure 2-27 : Comparaison avec les méthodes d'augmentation géométrique ; (a) proposition de [122] ; (b) proposition de [51] 106
Figure 2-28 : Comparaison de la simulation d'ajout de plis(a) avec les résultats des approches en data-driven (b) [59] ; (c) [140] 107
Figure 3-1:Pipeline de la méthode du positionnement. 110
Figure 3-2: (a) Squelette intégré avec l'approche [16] ; (b) L'extraction de points caractéristiques (vert), puis l'ajout de points supplémentaires comme jointures (bleu) ; (c) le squelette conçu en joignant automatiquement ces points ; (d) le squelette résultant 113

Figure 3-3 : (a) corps ciblé ; (b) vêtement déformé ; (c) alignement sans ajustement de l'orientation. (d) alignement après l'ajustement de l'orientation 118
Figure 3-4 : Articulations utilisées pour le processus d'orientation ; (a) pour le corps ; (b) pour le vêtement déformé 119
Figure 3-5 : Exemple de traitement de la pénétration ; (a) modèle avec des pénétrations ; (b) modèle après la correction des pénétrations 120
Figure 3-6 : Modèle final après l'application du processus de synthèse des plis 122
Figure 3-7 : Ajustement de vêtements sur trois corps humains ayant des poids différents 124
Figure 3-8 : Positionnement de deux modèles de vêtements sur sept corps humains ayant des tailles différentes 125
Figure 3-9 : Positionnement de différents types de vêtements sur un même corps 125
Figure 3-10 : Positionnement de vêtements sur un même corps en différentes postures 126
Figure 3-11 : Résultats de positionnement de deux modèles de vêtements ayant des résolutions différentes sur un même corps 127
Figure 3-12 : Résultats de l'ajustement d'un modèle de t-shirt sur trois corps humains scannés différents issus de [9] 128
Figure 3-13 : Résultats du transfert de quatre modèles de chemises ayant une taille différente sur un même corps 129
Figure 3-14 : Comparaison des résultats de la déformation du vêtement en utilisant le tétraédral de proposition de [93] (a) ; et l'approximation HRBF (b) 133
Figure 3-15 : Comparaison en termes de traitement des auto collisions entre la méthode standard basée sur l'enrobage [55] (a) et nos résultats (b) 134
Figure 4-1 : Principe général de la méthode de déformation basée sur des formes volumétriques 141
Figure 4-2 : Principe de construction des parties de la forme volumétrique 143
Figure 4-3 : Principe de calcul de la distance d'un sommet v par rapport à la forme volumétrique 144
Figure 4-4 : Principe de support de surface implicite ; (a) primitive à support compact ; (b) primitive à support global 146
Figure 4-5 : Compositions effectuées à une paire de primitives implicites formant une articulation ; (a) avec l'opérateur d'union ; (b-c) mélange basé sur le gradient avec différentes valeurs de α 148
Figure 4-6 : Tracé des gradients de fonction de distance pour une articulation ; (a) les gradients colinéaires à l'extérieur de l'articulation ; (b) position où les gradients ne sont pas colinéaires 150
Figure 4-7 : (a) Surface du maillage présentant un motif en dents de scie ; (b) maillage après l'application du lissage Laplacien 152
Figure 4-8 : Configuration d'entrée ; (a) squelette d'animation ; (b) poids d'enrobage ; (c) partitionnement du maillage 154
Figure 4-9 : (a) Définition des sphères au niveau des articulation de squelette d'animation ; (b) représentation volumétrique résultante 155
Figure 4-10 : Composition des segments de main lors de la déformation est effectuée sans introduire de lacunes ; (a) maillage initial ; (b) maillage déformé 156
Figure 4-11 : Déformation d'index avec différentes compositions des formes volumétriques ; (a) en utilisant l'opérateur union ; (b) avec l'opérateur basé sur le gradient ; (c) en utilisant un poids de mélange 157
Figure 4-12 : Index déformé avec différentes valeurs du seuil R 159

Figure 4-13 : Impact du choix des paramètres θ_1 et θ_2 sur le renflement des muscles lors de la déformation..... 160
Figure 4-14 : Comparaison de DBVS avec la méthode DQS ; (a) déformation avec DQS ; (b) déformation avec DBVS ; Le cercle rouge montre les régions améliorées par DBVS..... 161
Figure 4-15 : Comparaison des résultats de déformation avec (a) LBS ; (b) Dual-quaternion ; (c) DBVS ; Le cercle rouge montre les régions de contact ciblées par l'amélioration..... 162
Figure 4-16 : Comparaison de la déformation DBVS avec HRBF au niveau de la forme du maillage 163
Figure 4-17 : Comparaison de DBVS avec HRBF au niveau de l'alignement de surfaces 164

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Avantages et inconvénients de la représentation par surfaces splines 25
Tableau 1-2 : Avantages et inconvénients des surfaces implicites 29
Tableau 1-3 : Avantages et inconvénients des surfaces de convolution 31
Tableau 1-4 : Avantages et inconvénients des approches physiques de déformation 32
Tableau 1-5 : Avantages et inconvénients de l'approches déformation par masses-ressorts 34
Tableau 1-6 : Avantages et inconvénients de l'approches déformation par enrobage lisse 41
Tableau 2-1 : Temps d'exécution des principales étapes de la méthode de synthèse de plis 93
Tableau 2-2 : Comparaison avec les méthodes similaires récemment publiées en termes d'exigence d'entrée, modèles de vêtements supportés et le contrôle de la direction des plis 101
Tableau 2-3 : Comparaison avec des méthodes similaires 102
Tableau 3-1 : Comparaison avec des méthodes alternatives au niveau de données d'entrée ; posture du corps et type de vêtement 130
Tableau 3-2 : Comparaison avec des méthodes alternatives au niveau de déformation, gestion des pénétrations et préservation de caractéristiques du vêtement 131
Tableau 3-3 : statistiques de temps d'exécution (en seconde) pour certaines simulations présentées dans le présent chapitre 135
Tableau 4-1 : Temps d'exécution de l'approche de DBVS en comparaison avec l'approche d'HRBF [138] et l'approche de DQS 158

Liste des abréviations

NURBS	Non-uniform rational basis spline
FFD	Free form deformation
HRBF	Hermite Radial Basis Function
RBF	Radial Basis Function
LBS	Linear blend skinning
SSD	Sub-space deformation
GPU	Graphics Processing Unit
DQS	Dual Quaternion Skinning
CAO	Conception Assistée par Ordinateur.
FPM	Fast Projection Method
MCD	Motion Capture Database
GarNet	Garment Network
DOF	Degree of Freedom
SMPL	Skinned Multi-Person Linear
SCAPE	Shape Completion and Animation of People
DBVS	Deformation Based on Volumetric Shapes
MVC	Mean Value Coordinates

Introduction générale

Contexte de la thèse

Au cours de ces dernières décennies, les personnages virtuels sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne. Après avoir envahi les domaines du jeu vidéo et des films d'animation, on les retrouve maintenant peuplés des mondes virtuels où sont immergés des utilisateurs réels. Cependant, ces activités nécessitent des modèles de personnages et objets de synthèse plus réalistes. La difficulté est variable selon le type de personnages que l'on cherche à modéliser. En effet, il est délicat de rendre un personnage imaginaire crédible aux yeux de l'utilisateur, l'œil humain étant entraîné à voir de réels effets et percevant directement les moindres défauts dans le modèle virtuel. Afin de donner l'impression d'un monde virtuel convaincant, la manière dont se déforment les personnages et modèles virtuels est d'une importance capitale dans le processus de production des personnages 3D. Bien qu'on parle d'une réalité virtuelle, ces personnages doivent être *plausibles*, c'est-à-dire que leurs déformations doivent être naturelles et comporter les mêmes effets que les animations réalistes.

Le pipeline standard adopté par les studios professionnels pour la réalisation des personnages 3D, peut-être divisé en trois étapes distinctes, chacune était généralement réalisé par différentes méthodes :

- Phase de **modélisation :** le personnage virtuel est sculpté comme un objet statique dans une pose neutre et stockée sous la forme d'un ensemble de sommets connectés entre eux, pour former un maillage dont les faces sont triangulaires ou quadrangulaires.
- Phase de **déformation** : dans cette étape les utilisateurs augmentent la surface statique avec une série de fonctions géométriques qui transforment des parties entières de la surface du personnage. Ces fonctions de déformation utilisent des paramètres d'entrées pour contrôler le résultat de déformation.
- Phase **d'animation** : dans cette étape le personnage virtuel prend vie, à l'aide d'application d'un ensemble d'étape de déformation sur le maillage du personnage. Ces étapes sont positionnées par l'artiste dans un ordre chronologique.

Les étapes de modélisation, de déformation et d'animation impliquent toutes un effort manuel important qui implique plusieurs tâches fastidieuses, mais cruciales pour réaliser une animation

finale qui correspond exactement à ce que le réalisateur envisageait. Il est par conséquent nécessaire de développer des outils professionnels d'éditions 3D, qui à la fois facilitent les différentes tâches de production et produisent des modèles virtuels crédibles.

Le sujet de ce mémoire est au cœur d'application pour de nombreux domaines d'industrie du loisir, parmi lesquelles nous pouvons citer :

Jeux vidéo : les jeux en générale sont des alternatives de divertissement pour vivre des moments de récréation, quelles que soient nos quêtes. Dans les années 80, les jeux vidéo ont fait leur apparition, et depuis, ils présentaient un très grand secteur industriel qui génère un revenu très important. Au jourd'hui, les jeux vidéo en 3D occupent la première place des jeux vidéo utilisés par le grand public. Afin de répondre aux différents désirs des joueurs, les producteurs de jeux vidéo n'ont pas cessé de proposer de nouveaux produits, des univers variés, de nouvelles interfaces et des nouvelles possibilités d'interactivité. Cela à engendrer un dynamisme dans la recherche des nouvelles méthodes pour le développement et la création des modèles et des scènes en 3D pour les jeux vidéo.

Productions cinématographiques 3D : les films de synthèse 3D de nos jours ont connu une progression majeure au niveau de la quantité et la qualité des réalisations. En exploitant les techniques et les outils les plus récents de modélisation et animation, les films d'animation 3D ont concurrencé l'industrie du dessin animé traditionnel en matière de temps et coûts de fabrication. Face à cette utilisation de plus en plus importante des techniques d'animation 3D dans les productions cinématographiques d'aujourd'hui, l'amélioration des méthodes et techniques utilisées dans le processus de création des films d'animation en 3D est devenue un champ de recherche très important dans l'informatique graphique.

Réalité virtuelle : permet de simuler la présence d'un utilisateur dans un environnement artificiel généré en 3D. Les réalités virtuelles créent un environnement avec lequel l'utilisateur peut interagir. Il peut s'agir d'une reproduction du monde réel ou bien d'un univers totalement imaginaire. Ce domaine nécessite un taux de réalisme plus élevé que dans le cas des deux précédents domaines d'application que nous avons cités, c'est pour cela que sujets de recherches orientés vers ce domaine sont consacrés principalement à augmenter le taux de réalisme des modèles et personnages 3D utilisés.

Dans le cadre de cette thèse, nous souhaitons apporter des solutions au niveau de la déformation de personnages virtuels et en particulier en améliorant le réalisme par l'ajout de détails. Dans ce contexte, nous soulevons deux problématiques : Premièrement, les personnages 3D doivent revêtir une apparence réaliste lors de la déformation, à la fois au niveau d'aspect vestimentaire et au niveau de la déformation de ses articulations. Deuxièmement, les artistes numériques qui génèrent ces personnages doivent pouvoir les manipuler interactivement, et ce, de manière intuitive.

Problématique

Notre vision humaine du réalisme est particulièrement sensible à l'apparence et à la manière dont les objets se déforment. Tout défaut par rapport à un comportement attendu par l'œil, nous donnera l'impression que le modèle entier est anormal.

La déformation des différents modèles 3D jeu un rôle très important dans le processus de la production d'une scène d'animation virtuelle convaincante. L'importance capitale ici est de donner une apparence plausible aux modèles visuels. Par conséquent, afin que les déformations visuelles soient jugées satisfaisantes pour le grand public, il est indispensable de respecter certaines contraintes pour chaque catégorie du modèle 3D. Par exemple, un vêtement virtuel qui se déforme doit également engendrer des plis sur sa surface, une main virtuelle doit être animée sans avoir du gonflement exagéré au niveau des articulations.

Les techniques et outils professionnels les plus récents de production 3D ne fournissent cependant pas de méthodes de déformation automatiques et satisfaisantes pour la gestion des contraintes géométriques de modèles 3D. De ce fait, les artistes numériques sont obligés d'ajuster et de modifier manuellement les simulations avec différents paramètres, afin de se rapprocher des résultats visuels souhaités. Par conséquent, l'investissement en temps-machine et l'exigence des qualités artistiques pour la manipulation manuelle de paramètres rendent souvent l'utilisation de ces outils 3D fastidieuse. À l'heure actuelle, la réalisation de quelques secondes d'animation d'une production cinématographique 3D, peuvent être effectué en plusieurs jours de travail intensif par un artistes expérimentés.

Motivation

Dans le présent travail nous présentons différentes méthodes qui vont faciliter la tâche de modélisation et de déformation de surfaces 3D. Nos méthodes permettent d'ajouter des effets qui augmentent le réalisme du modèle 3D, ou d'exagérer un certain aspect de déformation dans le cas de manipulation des articulations d'un personnage 3D par exemple. Nous définissons des approches procédurales qui respectent les critères suivants :

- **Crédibilité** : Les méthodes décrites dans le présent travail permettent de générer des surfaces 3D plus crédibles par rapport à une modélisation ou une déformation classique. Dans nos propositions, on s'intéresse plus à la crédibilité des résultats de la déformation plutôt que à la précision numérique de la résolution des contraintes.
- **Contrôle et utilisabilité** : Nos méthodes assurent un degré de contrôle d'utilisateur sur le résultat visuel d'une déformation géométrique. En effet, il est souhaitable que les artistes ajustent la forme finale du modèle, ou la position de certaines déformations afin d'aboutir au résultat souhaité. Les méthodes que nous avons proposées peuvent être ajoutées comme des couches supplémentaires dans les outils professionnels, sans demander à l'utilisateur de modifier ces outils et sans alourdir le temps de calcul.
- **Efficacité :** Les approches décrites peuvent être utilisées comme post-traitement sur n'importe quel système de production du modèle 3D. La déformation et l'animation des modèles virtuels sont effectuées à vitesse interactive sur des machines standard utilisées généralement par le grand public.

Contributions

Nos contributions s'articulent autour de deux axes principaux.

Le premier axe de contributions se concentre sur la déformation rapide et le fait de rendre réaliste les vêtements d'un personnage. Premièrement, nous avons introduit une nouvelle méthode géométrique pour ajouter des plis sur des animations de vêtements [23]. La principale nouveauté de ce travail est l'utilisation des fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF) pour préciser la position et la direction des plis sur le maillage du vêtement. Contrairement aux approches existantes, cette méthode ne requière pas de base de données de plis ni de traçage manuel pour la localisation ou l'orientation de ces plis. Deuxièmement, nous avons proposé un nouveau système permettant d'adapter un vêtement donné à un corps humain cible ayant des formes et des postures diverses. La principale nouveauté de cette méthode est l'utilisation de fonctions de base radiale

d'Hermite pour approximer et déformer le maillage du vêtement, afin d'adapter la posture du corps humain cible. Après la déformation du vêtement, nous éliminons les interpénétrations potentielles entre le modèle humain et le vêtement en utilisant un algorithme de gestion des collisions.

Le second axe de contributions s'articule autour d'une nouvelle méthode de déformation d'une main virtuelle habillée d'une peau géométrique. Cette méthode permet la préservation de volume au niveau des articulations, et peut s'appliquée en temps réel sur une animation de main virtuelle. Cette méthode présente une nouvelle idée qui utilise l'approximation en formes volumétriques comme nouvelle représentation géométrique pour mieux contrôler le comportement de la peau virtuelle lors de la déformation. Cette méthode vise généralement la correction des effets indésirables introduits par les techniques standard de déformation comme le LBS ou dual quaternions [4].

Organisation du manuscrit

Ce manuscrit, composé de quatre chapitres, est organisé comme suit :

Le premier chapitre présente un état de l'art des différentes méthodes de modélisation et de déformation des surfaces 3D en mouvement. Nous détaillons les différentes méthodes de représentation de surfaces 3D. Ensuite nous présentons deux approches standard de déformation : approches physiques et géométriques. Enfin, nous passerons en revue les approches alternatives de déformation qui préservent certaines contraintes intrinsèques telles que le volume ou les longueurs en exposant leurs avantages et limites.

Le deuxième chapitre est consacré à notre première contribution proposée pour la synthèse de plis sur un maillage de vêtement porté par un personnage virtuel en mouvement. Nous explicitons la méthode de déformation du maillage de vêtement en utilisant une approximation à l'aide de surface implicite basée sur les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF). Nous détaillons ensuite la méthode de génération de plis basée sur le traçage des courbes de plis dans les régions qui présentent une forte déformation du maillage.

Le troisième chapitre présente notre deuxième contribution concernant la méthode de positionnement du vêtement sur un modèle humain 3D. Cette méthode est basée sur l'idée d'établir une correspondance entre la posture du vêtement et celle du modèle humain 3D. Afin

d'assurer cette correspondance, nous déformons le maillage du vêtement à l'aide du squelette d'animation et l'approximation en fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF).

Le quatrième chapitre décrit notre troisième contribution concernant l'animation du maillage associé à un squelette d'animation. Nous considérons en particulier le cas de la déformation d'une main virtuelle. Nous présentons une nouvelle méthode de déformation implicite basée sur le suivi du maillage. Cette contribution a pour objectif de surmonter les défauts de l'enrobage standard (LBS et DQS), en ajoutant une étape de post-traitement qui permet de corriger les positions des sommets du maillage déformé. La correction des positions est effectuée à l'aide des formes volumétriques considérées comme guides de déformation.

Les annexes présentent, d'une part, les résultats de l'étude analytique de deux catégories d'approches d'augmentation de plis sur le maillage du vêtement [1], et d'autre part les algorithmes d'enrobage standard (LBS et DQS).

La conclusion générale résume les quatre chapitres du travail de recherche et conclut par une présentation des perspectives.

Chapitre 1

État de l'arts

1.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous allons présenter quelques définitions et méthodes de deux étapes primordiales pour la manipulation des modèles 3D à savoir la modélisation et la déformation. La modélisation par surface est une représentation essentielle en animation. Il faut noter que le choix de méthode de modélisation d'une surface a des impacts sur la manipulation des objets 3D. Par conséquent, il est indispensable de considérer des méthodes de représentation et de déformations adéquates afin de pouvoir les manipuler efficacement et aisément.

Nous détaillerons premièrement les méthodes de modélisation par surface. Ensuite nous présenterons un état d'art des différentes approches de déformations de surfaces. Dans ce qui suit, nous expliquerons en détails les avantages et les inconvénients de chaque méthode de déformation. Nous abordons ensuite les travaux antérieurs réalisés dans le cadre de la déformation avec préservation de propriétés intrinsèques des surfaces particulières, comme les vêtements et la peau.

1.2. Modélisation par surfaces

Une surface est une structure utilisée pour représenter l'enveloppe géométrique d'un objet virtuel 3D. La surface définit donc la frontière physique d'un objet dans l'espace, et contient les propriétés fondamentales de sa forme. Une fois la surface est définie, il reste important de considérer d'autres paramètres sur cette forme, comme la couleur et les textures, afin d'obtenir un résultat visuel plausible. Dans la suite, nous présentons deux catégories de surfaces couramment utilisées dans la modélisation 3D : les surfaces explicites et les surfaces implicites. Chaque catégorie possède ses caractéristiques propres qui influencent son application. Le choix du modèle géométrique joue un rôle très important lors de la détection de collisions entre plusieurs modèles 3D ou entre différentes parties d'un même modèle, ainsi que lors de son affichage à l'écran.

1.2.1. Surfaces explicites

Un objet 3D dans la plupart des cas est défini par une surface complexe, qui est en général difficile à représenter avec une expression mathématique simple. D'où la nécessité de trouver un moyen d'approcher les formes complexes. Les surfaces explicites sont une solution pour modéliser un objet 3D par des modèles discrets. Elles consistent principalement à préciser d'une manière explicite l'ensemble des points de l'espace qui définissent la forme de l'objet 3D.

1.2.1.1. Surfaces polygonales

Les surfaces polygonales [46] permettent d'approximer une surface 3D à l'aide de primitives géométriques planes, le plus souvent des triangles ou des quadrilatères. La représentation est appelée maillage, qui est défini par un ensemble de polygones planaires appelés facettes. Les sommets de ces facettes sont le plus souvent positionnés dans un repère cartésien afin de définir la géométrie du maillage, tandis que la liaison d'adjacence entre sommets, appelée arêtes, définit la topologie de la surface 3D. La représentation d'un objet 3D par maillage triangulaire est la forme la plus simple qui est directement affichable par une carte graphique. Cette rapidité d'affichage rend ce type de représentation plus efficace pour l'utiliser dans le cas des jeux vidéo. La figure 1.1 illustre un exemple de modèle 3D composé d'un ensemble de facettes.

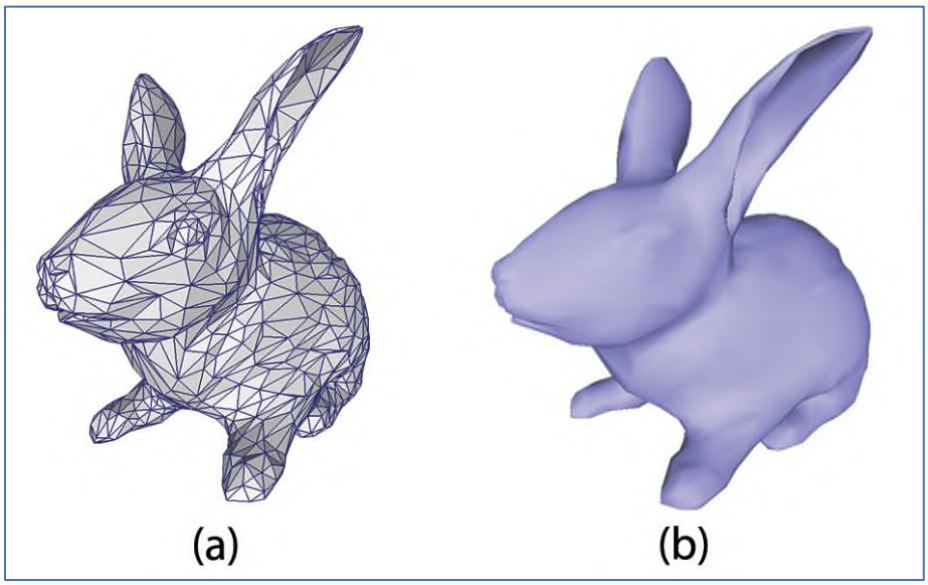


Figure 1-1 : Modèle 3D d'un lapin ; (a) maillage triangulaire ; (b) le modèle affiché sur l'écran

Quoique cette représentation soit rapide lors de l'affichage à l'écran, elle n'est pas la plus pratique à utiliser au cours des étapes de modélisation ou d'animation. En effet, la déformation d'un objet

3D nécessite la manipulation directe des sommets constituants son maillage. Plusieurs outils de modélisation ont été proposés pour alléger l'action de l'animation en lui donnant plus de gestion native des maillages polygonaux. D'avantages détails sur les caractéristiques spécifiques de cette représentation sont disponibles dans [2, 23].

1.2.1.2. Surfaces paramétriques

À l'inverse de la représentation en maillages polygonaux, les surfaces paramétriques sont les plus utilisées en modélisation car elles offrent un outil de dessin pratique et génèrent des surfaces beaucoup plus lisses que celles produites à l'aide des maillages polygonaux.

Une surface paramétrique S dans sa globalité est définie en exprimant l'ensemble des positions par lesquelles elle passe. Soit $P \subset \mathbb{R}^2$ un plan associé à un système de coordonnées (x, y) paramétrant ce domaine. Soit l'application g définie par :

$$g \begin{cases} P \subset \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}^3 \\ (x, y) \to g(x, y) \end{cases} \qquad (1.1)$$

La surface S peut donc être vue comme le résultat de la déformation d'un plan $P \subset \mathbb{R}^2$ en un sous-ensemble de $\mathbb{R}^3$ (figure 1.2).

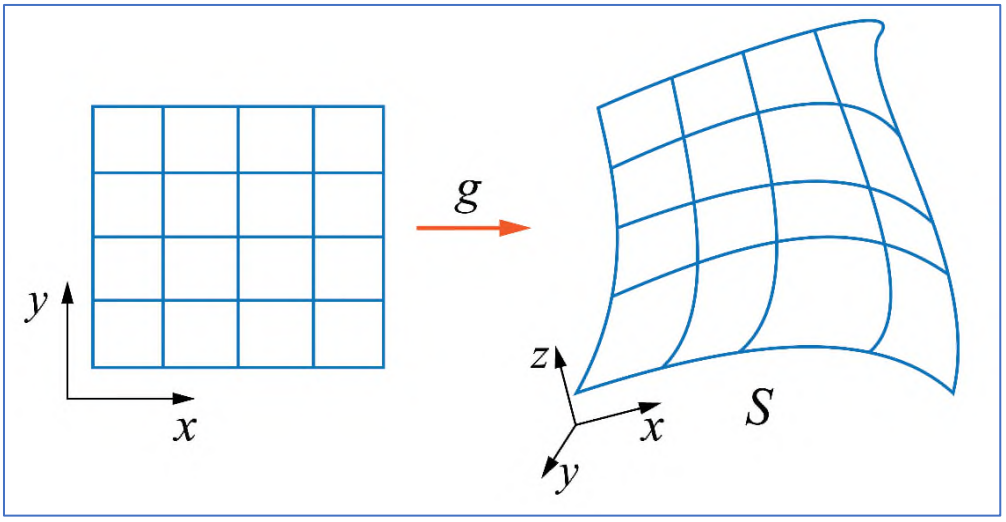


Figure 1-2 : Exemple de transformation du plan 2D en surface 3D

La fonction g contient les informations d'une paramétrisation globale définie par (x, y). Bien qu'il soit fréquent de confondre la fonction g avec la surface S, les deux ne sont pas équivalentes. Plus précisément, la surface S constitue la trace de la fonction g dans $\mathbb{R}^3$. La

connaissance de g implique celle de S, mais l'inverse étant fausse, et de plus la fonction g n'est pas unique pour une surface donnée.

Comme nous l'avons vu, la fonction g contient plus d'informations qu'une simple structure géométrique de la surface à modéliser, elle encode une paramétrisation globale de l'objet 3D. Cependant et dans la plupart des cas, cette paramétrisation est difficile à formuler par des fonctions mathématiques usuelles. Le principe d'usage de la représentation à l'aide de surfaces paramétriques en informatique graphique consiste à juxtaposer des parties des surfaces, dites "Patchs", afin de modéliser la forme globale de l'objet. C'est-à-dire que la position et les paramètres de continuités de la surface ne sont pas connus exactement que dans quelques points de la surface, le reste étant comblé par interpolation ou approximation. Alors la surface est définie par morceaux et non plus globalement. Nous détaillons par la suite différentes méthodes permettant de définir une surface complète par morceaux.

1.2.1.2.1. Modélisation par morceaux

En générale, une modélisation paramétrique par morceaux d'une surface S consiste à utiliser un nombre n (nombre de morceaux) de fonctions g_i défini sur des domaines P_i d'une manière que l'union respective de leurs surface s_i dans l'espace représente la surface globale $S = \bigcup s_i$ de l'objet 3D avec $i \in [1, n]$.

Une telle composition par morceaux assure un traitement local des caractéristiques de la surface 3D, ce qui rend la modélisation plus aisée. Dans la majorité des cas, définir exactement une surface donnée à l'aide d'un nombre fini de morceaux est très difficile voire impossible à cause de l'aspect complexe des surfaces 3D. Mais il est possible d'approcher le degré d'approximation de celle-ci avec une erreur centrée. Un bon choix de modélisation permet dans certains cas de faire converger un modèle discret vers la surface complexe lorsque le nombre de morceaux utilisés tend vers l'infini.

Dans l'intention de rendre encore la tâche de modélisation plus aisée, il est pratique de définir les fonctions de paramétrage sur un même domaine (triangulaire ou quadrangulaire) indépendamment du patch utilisé. Plus précisément, la surface 3D finale est obtenue par la composition des "patchs" initialement identiques dans le plan mais déformés séparément comme illustré sur la figure 1.3. Généralement, les patchs les plus utilisés pour la construction d'une

surface 3D sont ; les "patchs" splines bien qu'il en existe d'autres, comme "patchs" de Bézier [44] ou encore NURBS [111]. Nous allons tout d'abord définir les courbe splines (cas 1D) en détaillant leur fonctionnement, les différents types et leurs équations, avant d'étendre ces résultats au cas des surfaces paramétriques 3D.

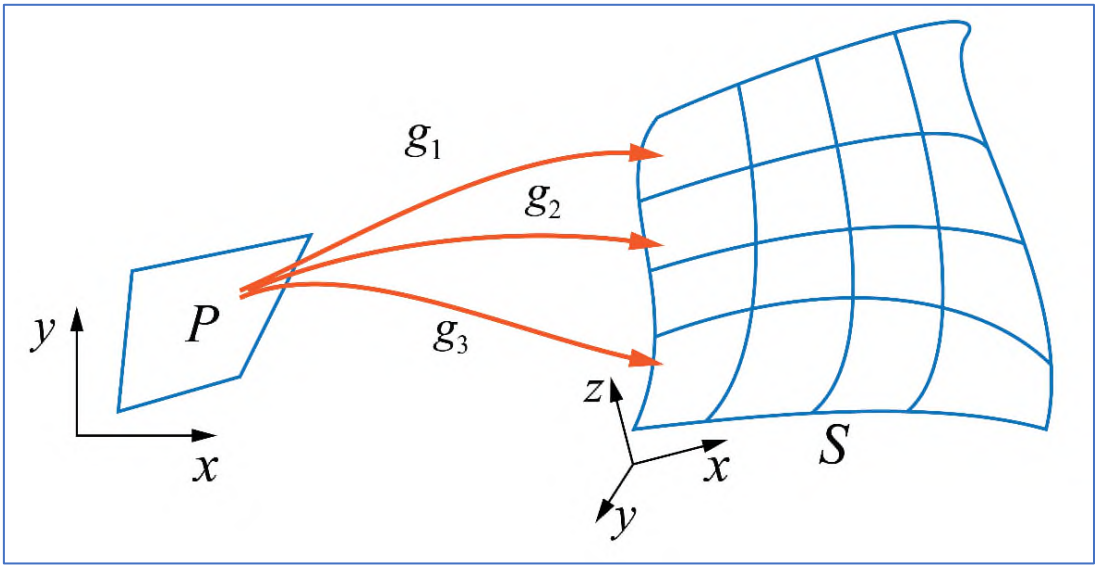


Figure 1-3 : Exemple de surface définie par morceaux à partir d'un même domaine

▪ Courbes splines

Une spline est une courbe représentée à l'aide de points de contrôle. Par exemple, le B-spline cubique est une fonction qui dépend d'un nombre défini de points, et qui permettent de générer une courbe polynomiale par morceaux à laquelle on assure certaines conditions de continuité au niveau des extrémités des portions de courbe. Chaque portion de courbe polynomiale est définie par un nombre fini de points de contrôle, ce qui fait que la déformation locale de la courbe est toujours assurée. Il existe de nombreux types de splines, à savoir, les splines d'interpolation et les splines d'approximation.

- Dans le cas de splines d'interpolation, la courbe passe par des points de contrôle et les segments cubiques générés se recollent en assurant une continuité C^1 en chaque point. Des exemples de ces splines sont illustrés sur la figure 1.4.
- Dans le cas des splines d'approximation, la courbe ne passe pas par les points de contrôle mais elle est englobée par le polygone formé par ces points. Ce type de courbe peut être utilisée comme atout efficace pour la détection des collisions. Les B-splines cubiques

uniformes illustrés sur la figure 1.4 sont la forme la plus simple des splines d'approximation.

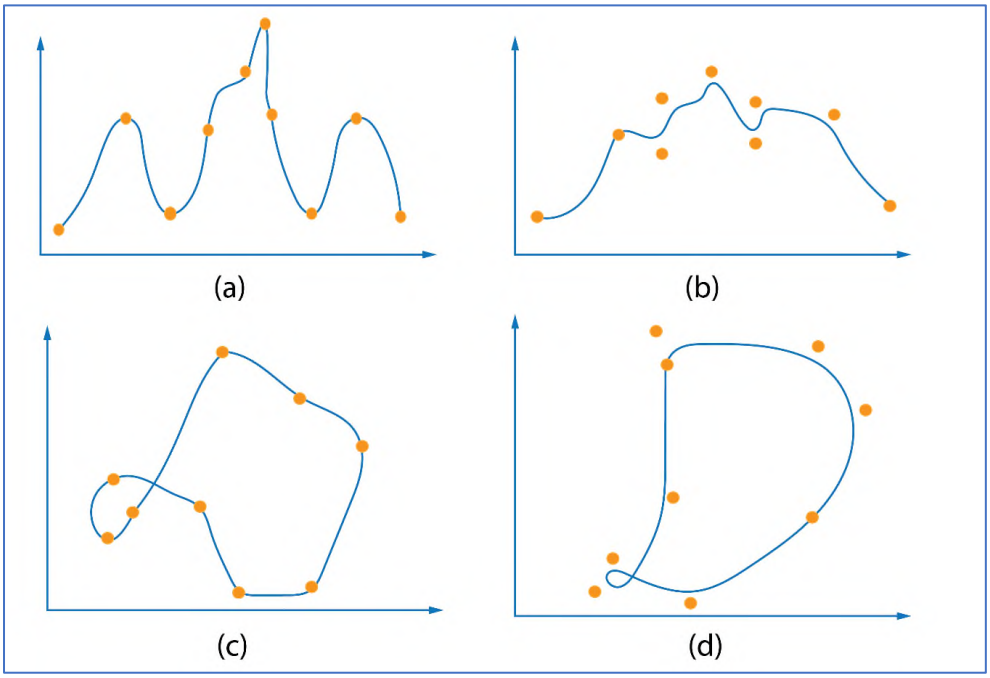


Figure 1-4 : Différents exemples de courbes splines générées à partir des mêmes points de contrôle : (a)-spline d'interpolation ; (b)-B-spline ; (c)-spline cubique fermée ; (d)-B-spline cubique fermée

- ## Surfaces splines

Les courbes splines peuvent être étendues à des surfaces splines bi-paramétriques qui permettent de créer des surfaces 3D. En effet, ceci est effectué avec l'extension des courbes par augmentation de la dimension de l'espace paramétrique. Le morceau de surface est alors l'équivalent d'une portion de courbe d'une spline simple. Le fonctionnement des surfaces splines reste le même pour les courbes, sauf que le domaine paramétrique est en 2D et le résultat de l'interpolation est une surface 3D.

Dans l'informatique graphique, les surfaces paramétriques sont devenues un standard pour représenter des surfaces lisses de géométrie complexe. En particulier, les outils professionnels tels que Autodesk Maya [14] ou Autodesk 3DS Max [13] utilisent des surfaces NURBS. Dans le tableau 1.1, nous avons résumé les avantages et les inconvénients de cette représentation.

Avantage	Inconvénient
– La formulation mathématiques définissant l'enveloppe est toujours la même pour toutes le formes d'objet (sphère, cylindre, formes libres …). – Le rendu se fait rapidement, par des algorithmes stables et efficaces de conversion en triangles. – Les NURBS sont invariantes aux transformations affines et perspectives ; elles sont une généralisation des B-splines non rationnelles et des surfaces de Bézier. – L'utilisation de points de contrôle permet à l'utilisateur de juger le résultat produit.	– La modélisation d'un objet complexe nécessite un grand nombre de points de contrôle, ce qui constitue un obstacle pour un utilisateur non expérimenté. – Le manque de souplesse lors de l'ajouts de détails à une surface préexistante. – Le raccordement des surfaces pose beaucoup de problèmes, par exemple, dans le cas de deux surfaces avec un nombre de patchs diffèrent. – L'utilisation d'une surface paramétrique peut aussi poser des problèmes au niveau de la détection de collisions, notamment lors de l'animation.

Tableau 1-1 : Avantages et inconvénients de la représentation par surfaces splines

Pour résoudre ce problème, les splines de topologie ont été proposées par Forsey et al. [48] puis généralisées par Gonzalez-Ochoa et al [53]. Dans ce même cadre, Yvart et al. [153] proposent une approche hiérarchique s'adaptant sur des splines à support triangulaire.

1.2.1.3. Surfaces de subdivision

Les surfaces de subdivision [11, 95] sont des surfaces paramétriques lisses définies comme le résultat d'un processus récursif de manipulation effectué à l'aide d'un schéma de subdivision. Ce schéma peut être caractérisé par le type de polygones utilisés dans le maillage de base (triangles ou quadrangles). Le processus de subdivision agit sur le maillage de base en subdivisant les polygones, dans chaque étape, la subdivision est faite en calculant les positions des nouveaux sommets créés et celles des anciens sommets de façon à ce que la surface résultante soit lisse. Les surfaces de subdivision permettent de créer des surfaces avec topologie quelconque, ce qui représente un avantage par rapport à des surfaces paramétriques, et le branchement des surfaces

ne posent aucun problème. Ainsi elles présentent un avantage au niveau de la simplicité d'implémentation, et dans le fait que les schémas de subdivision peuvent s'appliquer sur des maillages avec une topologie arbitraire, en plus, la continuité de la surface peut être contrôlée localement. Bien une telle surface de subdivisions ne dispose pas d'expression analytique directe, elle est très avantageuse au niveau de la déformation puisque l'on peut ne déformer que le maillage grossier.

Les schémas de subdivision les plus utilisés dans le domaine de la modélisation 3D sont : le schéma de Catmull-Clark [13], Doo-Sabin [42] et Charles Loop [97].

a) Schéma de subdivision de Catmull-Clark

C'est un schéma introduit par, il s'agit d'un algorithme d'approximation qui s'applique au maillage polygonal quelconque, la subdivision est procédée comme suit :

- Pour chaque facette du maillage, on insère un nouveau sommet de face, qui représente le barycentre des sommets originaux de la facette (Figure 1.5 (b)).
- Pour chaque arête du maillage, on insère un nouveau point appelé point d'arête, obtenu en moyennant les centres de l'arête et les sommets de face des deux facettes partageant cette arête (Figure 1.5 (c)).
- Actualiser les positions des sommets de polygone (Figure 1.5 (d)), tout en prenant en compte les nouveaux sommets et les points précédemment ajoutés.
- Enfin, le maillage final est généré en reliant les sommets comme il est illustré sur la figure 1.6 (e) ci-après.

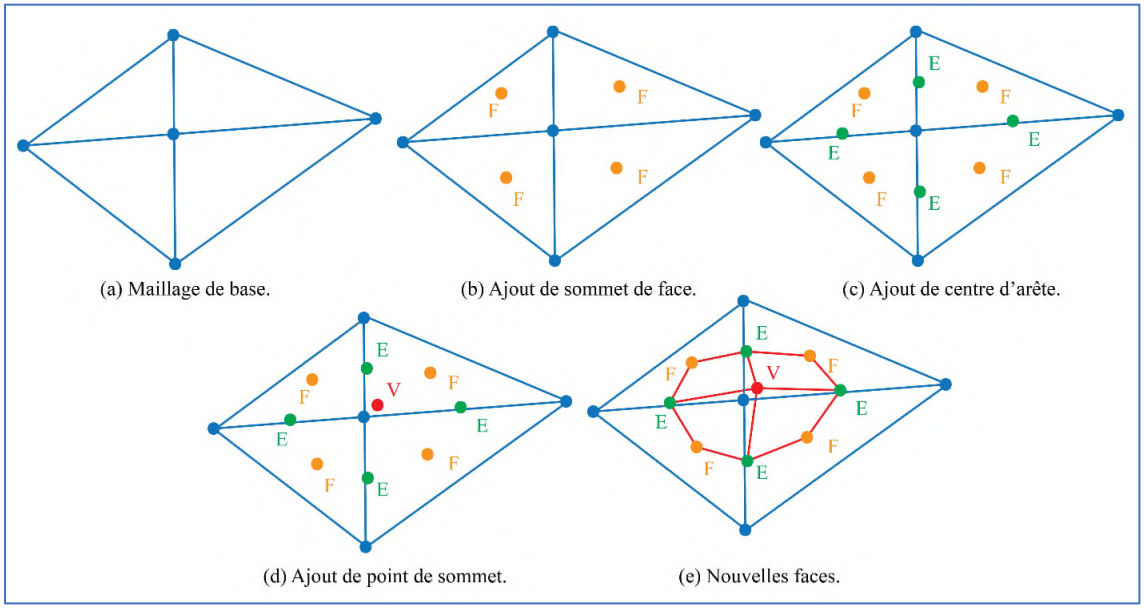


Figure 1-5 : Schéma de subdivision de Catmull-Clark

b) Schéma de subdivision de Doo-Sabin

Ce schéma de subdivision s'agit d'un algorithme d'approximation qui s'effectue selon les étapes suivantes :

- Calculer les milieux de chaque segment du maillage ;
- Calculer les milieux de chaque face du maillage (définis par la moyenne des sommets de la face considérée) ;
- Pour chaque sommet des faces, on joute un point dont les coordonnées sont la moyenne des sommets de la face considérée (Figure 1.6 (a) ;
- Les nouvelles faces du maillage sont obtenues en reliant ensemble les différents points ajoutés sur une même face d'un côté (Figure 1.6 (b)) et les points ajoutés au voisinage d'un sommet original d'un autre côté (Figure 1.6 (c)).

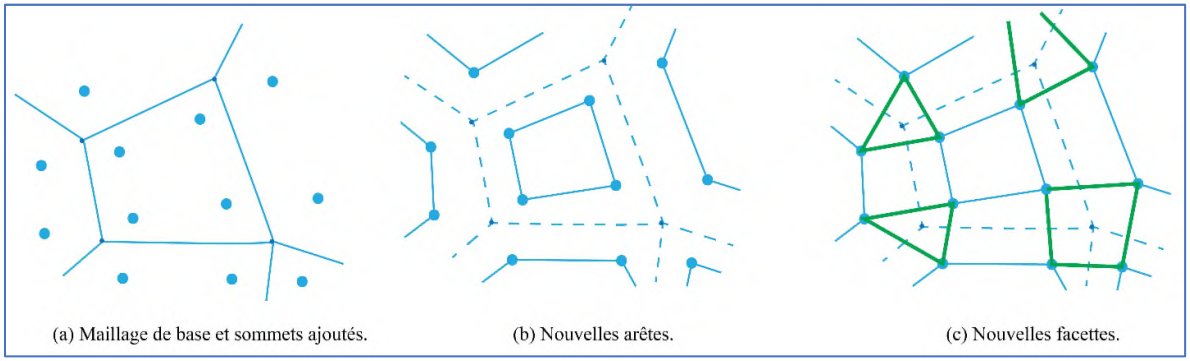


Figure 1-6 : Schéma de subdivision de Doo-Sabin

c) Schéma de subdivision de Loop

Ce schéma introduit par Charles Loop [15], il s'agit d'un schéma de subdivision primal pour approximer des maillages triangulaires. En utilisant ce schéma, le nouveau maillage est déduit suivant les deux étapes suivantes :

- La première étape consiste à effectuer un processus de raffinement sur maillage de base en ajoutant des nouveaux sommets. Ceux-ci correspondent aux milieux des arêtes. En reliant ces sommets, chaque triangle est alors subdivisé en 4 nouveaux triangles (Figure 1.7 (b)).
- La deuxième étape consiste à déplacer les sommets du maillage suivant une loi de positionnement prédéfinie, de manière à obtenir un maillage lisse (Figure 1.7 (c)). La position du nouveau sommet est donnée par une moyenne pondérée de ses sommets voisins dans le maillage.

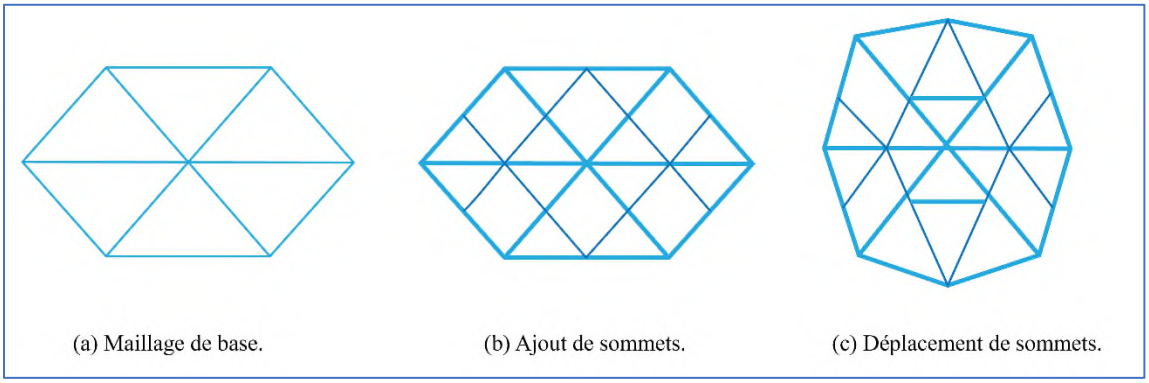


Figure 1-7 : Schéma de subdivision de Loop

1.2.2. Surfaces implicites

Jusqu'à présent, nous avons vu comment définir une surface de manière explicite. Cette représentation explicite est avantageuse pour le rendu de l'objet 3D. Cependant, Cette définition

n'offre pas d'information sur la position des points situés hors de l'objet 3D, et elle nécessite un contrôle explicite de la connectivité. En effet, pour effectuer des changements topologiques nécessaires à l'animation d'un objet, l'utilisateur est obligé de traiter explicitement ces changements ce qui se révèle complexe d'un point de vue pratique et couteux en temps de calcul.

Une surface implicite est définie par une fonction $F:\mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$ qui associe une valeur scalaire à chaque point de l'espace. Soit S une surface plongée dans $\mathbb{R}^3$, la représentation implicite de S revient à définir les positions de l'ensemble de ses points comme étant la solution d'une équation à 3 variables. Ainsi S peut être définie par l'expression suivante :

$$S = \left\{ X \in \mathbb{R}^3 \middle| F(X) = iso \right\} \qquad (1.2)$$

avec iso est une valeur scalaire constante appelée l'iso-valeur.

Les fonctions implicites les plus connues et les plus simples sont les ellipsoïdes définis par une fonction F de la forme :

$$F(x,y,z) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \quad (1.3)$$

Notons que le choix de F n'est pas unique pour modéliser une surface S donnée. De plus, tout couple $\langle F, iso \rangle$ ne représente pas la surface de la même manière décrite précédemment par le paramétrage d'un domaine du plan dans l'espace. Le tableau 1.2 représente quelques avantages et inconvénients des surfaces implicites.

Avantages	**Inconvénients**
– Il est facile d'obtenir un grand nombre de formes différentes à l'aide de fonctions mathématiques simples. – Avec la modification de *iso* génère des surfaces avec des topologies différentes.	– Le contrôle direct de la structure de la surface n'est pas assuré. – Il n'est pas possible de déterminer si un point de l'espace appartient ou non à une surface implicite. – On ne peut pas connaitre le voisinage explicite d'un point d'une surface implicite.

Tableau 1-2 : Avantages et inconvénients des surfaces implicites

De la même manière que la modélisation explicite, connaitre exactement la fonction F ne permet pas forcément de modéliser entièrement une surface complexe. Il est toujours nécessaire de passer par une étape d'approximation discrète. Dans ce contexte, les surfaces implicites à squelettes représentent une solution qui a connu un succès. Elles consistent à utiliser des primitives qui jouent le rôle de squelette de modélisation de la surface implicite (point, segment, courbe, surface) pour lesquelles il est possible d'évaluer la distance à un point donné et une fonction potentiel permettant de définir une épaisseur autour de ce squelette. La modélisation est ainsi fortement simplifiée. De nombreuses approches se sont intéressées au choix de primitives du squelette ainsi qu'au processus du mélange des potentiels [16, 66, 67, 154, 64].

1.2.2.1. Modèle discret par squelette

Les modèles implicites par squelettes sont créés par la décomposition du champ de potentiel global F en n champs partiels simples f_i. Ces champs de base définissent des surfaces partielles qui seront ainsi mélangées implicitement. Alors F est formulée comme suit :

$$F(p) = \underset{i\in[1,n]}{K} f_i(p) \quad (1.4)$$

Avec K est l'opérateur de composition.

L'union directe des champs partiels est l'opérateur de composition le plus utilisé [123], mais il est possible de définir des opérateurs spéciaux et plus complexes souvent restreint aux combinaisons binaires. Les champs de base f_i sont des fonctions définies à partir de primitives de squelette (points, segments ou triangles). Ainsi, la fonction associée possède des caractéristiques contrôlables liées au positionnement et à l'orientation du squelette. Les modèles de squelette utilisés pour la modélisation des surfaces implicites sont nombreux, on peut citer :

a) Représentation en Blobs

Cette représentation connue sous le nom de Blobs, a été introduite au début des années 1980 par Blinn [21]. Elle consiste à utiliser une primitive sphérique comme squelette. Soit par exemple un squelette formé par un seul point dans une position initiale c_0, la fonction de potentiel f_i associée à ce squelette dans une autre position p de l'espace, est donnée par la formule suivant :

$$f_i(p) = \exp\left(-\|p - c_0\|^2\right) \quad (1.5)$$

Plus précisément, la fonction f_i est considérée comme une fonction décroissante de la distance par rapport à la position du squelette.

b) Surfaces de convolution

Les surfaces de convolutions introduites par Bloomenthal et Shoemake [22], permettent de créer des mélanges lisses de primitives implicites complexes à l'aide d'un mélange par sommation. En effet, le champ résultant de cette approche peut donc être considéré comme la somme infini des contributions d'un ensemble de squelettes unidimensionnels. La fonction f_i associé à un squelette unidimensionnel est donc obtenue par l'intégration suivante :

$$f_i(p) = \int_{q \in E} g\left(\|p-q\|\right) dq \quad (1.6)$$

Avec g est la fonction noyau d'intégration du squelette E.

Nous pouvons noter que les surfaces de convolution introduites par McCormack et al. [104] sont parmi les plus utilisées. Elles consistent à utiliser un noyau d'intégration particulier appelé noyau quasi-Cauchy (par simple ressemblance avec la loi de Cauchy élevée au carré [127]). La fonction noyau g utilisée dans ce cas a l'avantage d'être lisse et rapidement décroissante. En plus, l'intégrale le long d'un segment est facilement déterminé :

$$g(x) = \frac{1}{\left(1+s^2x^2\right)^2} \quad (1.7)$$

Avec s un paramètre qui permet de contrôler le rayon de décroissance.

Les avantage et inconvénients des surfaces de convolution sont cités dans le tableau 1.3 ci-après.

Avantages	Inconvénients
– La surface résultante est une surface lisse, même si les squelettes possèdent des discontinuités au niveau des tangentes. – La surface résultante ne possède pas de marques visuelles de transition lors du passage d'un squelette à l'autre.	– La nécessité d'évaluation de l'intégrale de la fonction g pour chaque fonction de potentiel f_i.

Tableau 1-3 : Avantages et inconvénients des surfaces de convolution

1.3. Déformation physique

La déformation peut être vue comme la réponse d'un corps aux forces à laquelle il est soumis. Si cette réponse respecte des lois physiques décrivant l'évolution d'un corps réel, la déformation est dite physique. Théoriquement, les lois décrivant l'évolution d'un objet sous l'action des forces sont exprimées de manière différentielle, à la fois temporellement et spatialement. L'évolution de la forme de l'objet se formule donc à l'aide d'intégration d'une équation aux dérivées partielles. Les avantage et inconvénients des approches physiques de déformation sont cités dans le tableau 1.4.

Avantages	Inconvénients
– Le résultat obtenu avec ces approches est visuellement plausible. – Le résultat est quantifiable, ce qui assure un degré de précision absolue pour l'utilisateur. – La cinématique et la dynamique de l'objet sont prises en compte lors de la déformation.	– Le contrôle du résultat final issu d'une déformation physique est généralement difficile. Il devient nécessaire de refaire déformation pour tenter de converger vers le résultat souhaité. – La résolution des équations aux dérivées partielles est généralement effectuée à l'aide d'outils avancés d'analyse numériques. Ces solutions numériques sont spécialement couteuses en temps d'exécution et en mémoire. De plus, les risques de divergence numérique sont probablement forts.

Tableau 1-4 : Avantages et inconvénients des approches physiques de déformation

1.3.1. Modèle à masses-ressorts

Les modèles masses ressorts sont mis en place dans des applications de modélisation informatique par Miller et al [107]. Ce sont les modèles physiques les plus simple d'un point de vue théorique et pratique.

Bien que les modèles à ressorts soient connus par leur approximation d'un objet continu en positions discrètes, ils sont peu précis par rapport aux approches continues telles que l'approche par volume ou élément finis. Cette faiblesse se révèle spécialement handicapante pour les

applications graphiques destinées au domaine médicale ou d'ingénierie ayant pour vocation de servir de prédiction numérique exacte. Cependant, les autres domaines graphiques ne nécessitent pas la garantie de l'aspect prédictif du modèle, mais essentiellement d'assurer une apparence visuelle plausible. Par conséquent, ce modèle se révèle très adapté dans de nombreux cas d'animation 3D et reste l'une des méthodes les plus répandues.

À l'aide de ce modèle, un objet étant représenté par des masses discrètes, les seuls degrés de liberté prise en charge sont ceux de la translation de ces masses. Soit p_i la position d'une masse discrète i. Ces masses et leurs caractéristiques sont appelées *particules*. Entre deux particules, on considère le module d'élasticité constant. Ce qui peut être traduit par modélisation par un ressort. Ce système est résumé par la loi de Hook comme suit :

$$H = R\Delta L \qquad (1.8)$$

Avec H est la force de traction/compression générée par le ressort, ΔL est la variation de longueur de la particule par rapport à sa position de report, R est la raideur du ressort, aussi appelée constante de rappel.

Dans le cas d'un modèle 3D, l'équation vectorielle d'un ressort centré en position p_0 avec une longueur au repos L_0 est exprimée comme suit :

$$H = R\left(\left\|p - p_0\right\| - L_0\right)\frac{p - p_0}{\left\|p - p_0\right\|} \qquad (1.9)$$

Un modèle 3D complet est représenté par une structure de graphe contenant des sommets V_i et M_i les ressorts reliant ces sommets. Éventuellement, chaque sommet de v est relié à d'autres sommets générant alors un grand nombre de ressorts.

En pratique, les sommets V_i sont seulement reliés à leurs voisins les plus proches topologiquement. Ainsi, pour modéliser des objets volumiques, on utilise des ressorts diagonaux, comme dans la proposition de Chen et al. [34], alors que les objets comme des tissus, sont modélisés des ressorts vers les voisins d'ordre 2 comme dans la proposition de Breen et al. [25]. On désigne la configuration (V_i, M_i) sous le terme réseau.

Le tableau 1.5 ci-après présente quelques avantages et inconvénients d'une approche masses-ressorts.

Avantages	Inconvénients
– Ces modèles discrets sont caractérisés par leur simplicité d'implémentation, ainsi qu'ils sont adaptables directement aux surfaces polygonales. – Les modèles discrets sont caractérisés par leur rapidité de simulation. Ce qui explique leur réussite à obtenir des résultats interactifs utilisable dans les jeux vidéo.	– La résolution numérique de systèmes à masses ressort peut générer des divergences du système qui s'interprètent visuellement par des coupures brutales pouvant aller jusqu'à l'explosion du modèle. – La modélisation par masse-ressort ne converge pas absolument vers le résultat physique réel. – Il est difficile de prévoir le comportement de modèle lors de la simulation à haute résolution.

Tableau 1-5 : Avantages et inconvénients de l'approches déformation par masses-ressorts

1.3.2. Animation physique de vêtements

Les simulations physiques de vêtements ont été traitées, il y a longtemps dans le domaine d'informatique graphique [30, 15, 136], ces recherches sont basées sur les mesures physiques de raideurs proposées par Kawabata [79]. Récemment, des approches de simulations particulaires restent les plus répandues [52, 95] pour des applications interactives. Ainsi, la modélisation par la mécanique des milieux continus a connu un développe important [136, 76]. Une simulation de vêtements portés par un personnage virtuel nécessite également la mise en place d'un processus robuste de gestion de collisions entre le tissu et le corps animé. Ce processus n'entre pas également dans le cadre de ce travail. Cependant on peut noter que la méthode de traitement des collisions proposée par Bridson et al. [26] est l'une des approches les plus utilisées dans ce cadre (intégré dans des logiciels de modélisation et animation comme Blender [38]).

Afin d'obtenir l'apparence visuelle plausible d'un vêtement porté par un caractère virtuel, il est nécessaire de créer une surface caractérisée par un faible étirement ou contraction. Dans la réalité, un tissu peut ainsi être définit comme une surface quasi-inextensible. C'est-à-dire que les

longueurs mesurées à chaque point de la surface restent pratiquement préservées. Les vêtements ont souvent la caractéristique de se replier sans contraction ni élongation. Visuellement, cette contrainte intrinsèque de la surface représente l'origine de la génération des plis caractéristiques des vêtement.

Par conséquent, lors de l'une simulation d'un vêtement 3D, la contrainte intrinsèque de la surface doit donc être formulée par son modèle physique. La manière la plus simple consiste à modifier arbitrairement les valeurs de raideur des systèmes masses-ressorts standard. Cependant cela présente des problèmes majeurs :

- L'instabilité des modèle masse-ressort. En effet, une simulation avec une propriété qui limite la compression dans le plan de la surface rend invariablement la résolution des systèmes male conditionnée [35].
- Le problème de rigidité de modèle masse-ressort dans le cas de maillages triangulaires [43, 34]. Connu sous le terme de *locking artifact*, c'est la difficulté de déformer le modèle qui soumit l'action de contraintes. Cela est causé par l'augmentation de la raideur des ressorts ce qui rend le modèle très rigide.

L'utilisation de modèles masses-ressorts est particulièrement efficace pour simuler des objets de surfaces peu rigides à basse résolution. Ils assurent une déformation interactive qui prend en considération la dynamique du mouvement tout en gérant les collisions. Par contre, ces modèles ne sont pas adaptés pour le cas d'animation de vêtements portés par des caractères virtuels et qui présentent des plis lors de l'animation. Dans ce cadre, on note qu'il existe plusieurs tentatives d'amélioration de ces modèles ; par exemple ; la proposition de Bergou et al. [17] proposent une approche qui utilise une simulation à basse résolution pour guider une simulation à haute résolution afin d'ajoutes des détails ultérieurs sur le maillage de vêtement.

1.4. Déformations géométriques

Comme alternative aux approches physiques, les approches géométriques se concentrent non plus sur les lois qui produisent la déformation, mais sur le résultat de l'animation elle-même. Précisément, c'est des méthodes axées sur les résultats à l'opposition de modèle générateur. En utilisant ces modèles géométriques l'artiste modélise l'animation qu'il souhaite par la déformation directe de la forme de l'objet.

Les approches géométriques permettent de surmonter la complexité de la modélisation basée sur des contraintes physiques. En effet, la création d'une animation de caractère virtuel complet à l'aide du mouvement physique de squelette, muscles, tendons, etc. est d'une complexité énorme. En outre, il est relativement préférable de déplacer certaines parties du corps manuellement tels que la main, le bras, etc. Par contre, l'artiste ne peut pas contrôler directement ces types d'actions à l'aide des forces physiques.

1.4.1. Classification des méthodes géométriques

Pour donner à l'utilisateur un large choix de modélisation et d'animation, il est préférable de définir des méthodes de déformation destinées aux diverses surfaces à animer. Dans le cas d'un maillage, le déplacement individuel de chaque sommet permet un degré de liberté très élevé, cependant ce type de déplacement est hors de portée d'un utilisateur. Par conséquent, il convient désormais que les outils de déformations géométriques doivent assurés un compromis entre les degrés de liberté destinés à la déformation et la simplicité de spécification de ces outils. Plusieurs méthodes de déformations géométriques ont été déjà développées et elles sont intégrées dans les outils professionnels de modélisation à savoir la méthode de déformation par cages, par subdivisions, par squelettes, etc.

On peut distinguer trois types principaux de déformations géométriques :

- Déformations de l'espace : cette catégorie vise à déformer l'espace dans lequel il est modélisé l'objet.
- Déformations basées modèles : cette catégorie consiste à définir dans l'espace des échantillons des formes possibles à l'aide d'un nombre restrient de paramètres. La structure finale de l'objet est alors donnée par une combinaison de ces paramètres.
- Déformations basées surfaces : ce type de déformation définissant la forme à partir de certaines propriétés que la surface de celle-ci doit assurer.

1.4.2. Déformations de l'espace

Les déformations de l'espace consistent à considérer le modèle comme étant simulé dans un espace 3D. Le processus de déformation n'est donc pas appliqué directement sur la surface de l'objet, mais sur l'espace qui le comporte. Ce type de méthode est indépendant du type de définition du modèle à déformer. Ainsi la surface du modèle peut être définie par un maillage, par une surface implicite, ou même par des points non connectés.

Il existe diverses méthodes simples et contrôlables pour déformer un espace 3D [7, 49]. Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques modalités de méthodes classiques. La déformation par cages, guidées par le geste ou par des courbes. Ensuite nous allons détailler plus particulièrement la déformation par squelettes.

1.4.2.1. Déformations par cages

Cette catégorie de déformation est la plus intuitive à comprendre. Dans ce cas, l'espace 3D étant défini comme une grille que on appelle cage répartie dans un intervalle de l'espace. En bougeant les points caractéristiques de la cage, on déforme l'espace contenu par interpolation suivant la position de ces points.

Dans la configuration la plus simple, la cage est définie en grille cartésienne rectangulaire contenant $\left(N_i \times N_j \times N_k\right)$ point caractéristique, orientée suivant le repère global de l'espace $\left(i, j, k\right)$. L'utilisateur peut facilement déplacer l'ensemble des points de la grille, ce qui engendra ensuite une déformation globale, continue et lisse de l'espace. Classiquement, l'interpolation de l'espace se fait à l'aide des fonctions splines. Les positions de la grille sont considérées alors comme polygone de contrôle, cette méthode est connue sous le nom de la déformation de forme libre (*FFD : Free Form Deformation*) [125, 37, 72].

Bien que les méthodes FFD avec grille sont connues par leurs relations directes avec les fonctions d'interpolation lisses de type spline, la grille utilisée ne prend pas en compte la topologie d'un objet complexe. En effet, deux modèles proches dans l'espace, mais éloignés sur le plan géodésique, seront déformés de manière quasi identique par l'interpolation utilisée. Si on prend par exemple l'animation d'un personnage représenté dans une telle grille. Le déplacement des points de contrôle de la grille influence le bras gauche et influencera également le bras droit. Il n'est pas possible de faire bouger indépendamment les articulations d'un tel personnage.

1.4.2.2. Déformations définies par le geste

Pour avoir une déformation plus contrôlable, Angelids et al [8] ont proposé une méthode qui prend comme paramètre les informations de geste d'un utilisateur à savoir la trajectoire et la région d'influence, ces informations sont ensuite utilisées comme guide de la déformation à réaliser. L'idée principale est d'établir une série de déformations rigides effectuées dans l'espace suivant une trajectoire définie par l'utilisateur. L'importance de chaque déformation est

déterminée par le temps passé sur chaque position. Finalement, les déformations sont interpolées à l'aide de la méthode d'interpolation linéaire comme dans la proposition de Alexa et al. [5].

Ce type d'approche permet de réaliser des déformations qui préservent les caractéristiques géométriques complexes d'un objet 3D. Cependant, son application demande une intégration temporelle des sommets le long d'un champ vectoriel. Les trajectoires suivies ne sont pas définies analytiquement pour les champs utilisés, ainsi que l'intégration doit se réaliser numériquement ce qui empêche la déformation en temps réel d'un maillage ayant une haute résolution.

1.4.2.3. Déformations basées sur des courbes

En 1998 Singh et al. [130] ont introduit un concept appelé Wires, qui permet de générer des déformations sur la surface d'un objet. Cette méthode est basée sur le concept de tracer des courbes sur la surface, ensuite de générer des inflations locales autour de ces courbes tracées. Comme dans le cas des FFD, le système Wire est applicable sur différents modèles de surface, qu'il s'agisse des sommets d'un maillage ou d'un ensemble de points de contrôle. De même, Cutler et al. [49] ont proposé une méthode basée sur des courbes pour effectuer des déformations locales sur le maillage de vêtement. En adoptant le même concept de cette dernière méthode, Rohmer et al [122] ont proposé une méthode de création de plis de tissu à base des courbes.

Ces méthodes s'avèrent intéressantes pour la génération de détails sur des surfaces tels que des plis de vêtements portés par des personnages. Notons que les plis de vêtements sont principalement constitués par le mouvement du corps humain, ce mouvement peut être une compression ou un étirement. Il est essentiel que ces plis puissent se mélanger d'une manière lisse lors de mouvement de tissu.

1.4.2.4. Déformations par squelettes

Les déformations à l'aide de squelettes rentrent dans le cadre des méthodes de déformation de l'espace, bien que qu'elles soient uniquement appliquées sur les sommets discrets d'une surface triangulée [81]. Dans ce cas, l'objet prolongé dans l'espace est contrôlé par la position d'un squelette d'animation : c'est une structure hiérarchique de repères (appelé articulation) liés par des lignes (appelé os), comme il est illustré sur la figure 1.8. Cette catégorie d'animation est préférable pour les formes articulées (personnages, mains, …), à cause de la forte ressemblance entre la structure d'un squelette d'animation et le squelette anatomique du corps réel.

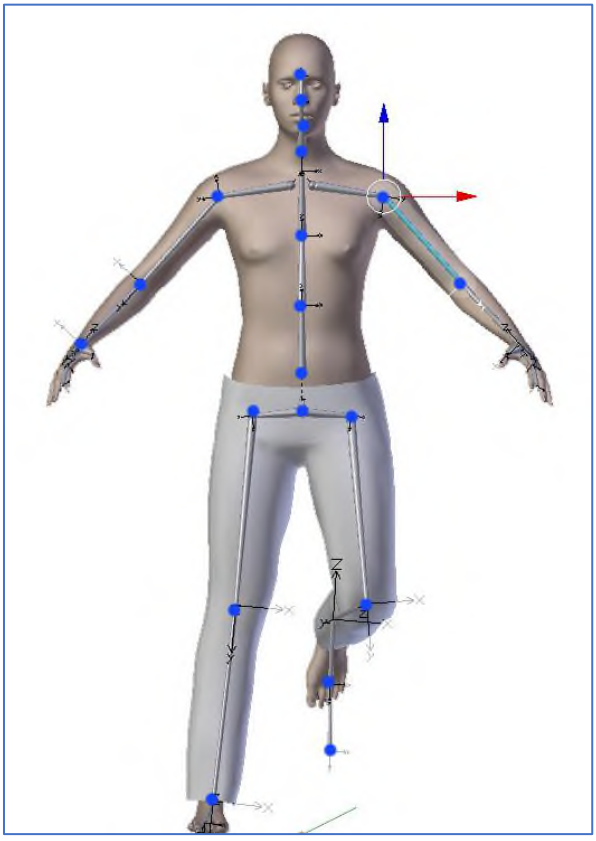


Figure 1-8 : Exemple de squelette d'animation formé par une structure hiérarchiques de repères

Le principe de la déformation à l'aide de squelette d'animation est le suivant :

- Chaque partie de l'espace est pratiquement liée à un ou plusieurs repères de squelette d'animation.
- Il est facilement possible de d'articuler manuellement les os, ce qui permet de définir l'animation du squelette.
- La déformation de l'espace lors de l'animation est calculée comme la somme pondérée des positions relatives des articulations du squelette d'animation.

1.4.3. Déformation par enrobage (alias Skinning)

En animation, cette méthode est connue sous le nom de *Skinning*, dans laquelle la déformation d'un objet est contrôlée par un mélange de transformations rigides des os du squelette. Elle est souvent utilisée pour l'animation de personnages, dans les jeux vidéo et les effets spéciaux. Le but de cette méthode est de définir l'animation d'un personnage en manipulant son squelette ; c'est à dire d'exprimer la position d'un maillage surfacique par un ensemble de degrés de liberté comprenant la position et l'orientation, couramment représentés par des repères.

1.4.3.1. Enrobage rigide

L'enrobage rigide (*Rigid skinning*) est l'une des premières méthodes créées pour l'animation des caractères virtuels dans le domaine de jeux vidéo 3D, cette technique est inspirée de chaine articulé en mécanique. L'idée principale derrière l'enrobage rigide est d'attacher les sommets du maillage à certains os du squelette [81]. Le nombre d'os du squelette est arbitraire, mais chaque sommet du maillage est associé à la position d'un unique os. Par conséquent, l'objet animé est partitionné en segment suivant le mouvement des articulations du squelette. L'utilisateur a donc le choix de faire bouger certaines articulations par des translations ou des rotations, et tous les sommets qui suivent les os animés seront ensuite repositionnés.

Soit $M_j(t)$ la matrice de transformation associée à l'articulation j du squelette à un instant t. Nous supposons que le squelette soit dans sa position de repos à l'instant t_0. La position $p(t_0)$ d'un sommet quelconque de l'objet peut être modifiée en appliquant la transformation $M_j(t)$ au cours du temps. Cette déformation dite rigide est effectuée à l'aide de la formule suivante :

$$p(t) = M_j(t) M_j^{-1}(t_0)\, p(t_0) \qquad (1.10)$$

Cette relation est exprimée dans un repère local dont l'origine est l'articulation j. Par conséquent la déformation engendrée (enrobage rigide) n'est pas une transformation globale. Ce qui peut entraîner des auto-intersections et élongations importantes dans la surface déformée. La méthode d'enrobage rigide a été largement utilisée dans l'implémentation des jeux vidéo [14].

1.4.3.2. Enrobage lisse

Afin d'éviter les défauts d'enrobage rigide (auto-intersections et élongations) dans le cas des caractères animés, M-Thalmann et al. [101] ont proposé une approche d'enrobage lisse (*Smooth Skinning*). Cette approche permet de lier le calcul de la position des sommets au mouvement de plusieurs articulations au même temps. L'influence qu'exerce chaque articulation sur la position du sommet est donné par un paramètre de pondération w appelé poids d'enrobage. Sur la figure 1.9, nous avons illustré un exemple de déformation d'un cylindre avec l'enrobage lisse.

La déformation par enrobage lisse est très répandue dans le domaine graphique. Elle est référencée sous diverses appellations [53, 84, 68] : déformation en sous-espace (*SSD : Subspace Deformation*) ou l'enrobage par interpolation linéaire (*LBS : Linear Blend Skinning*).

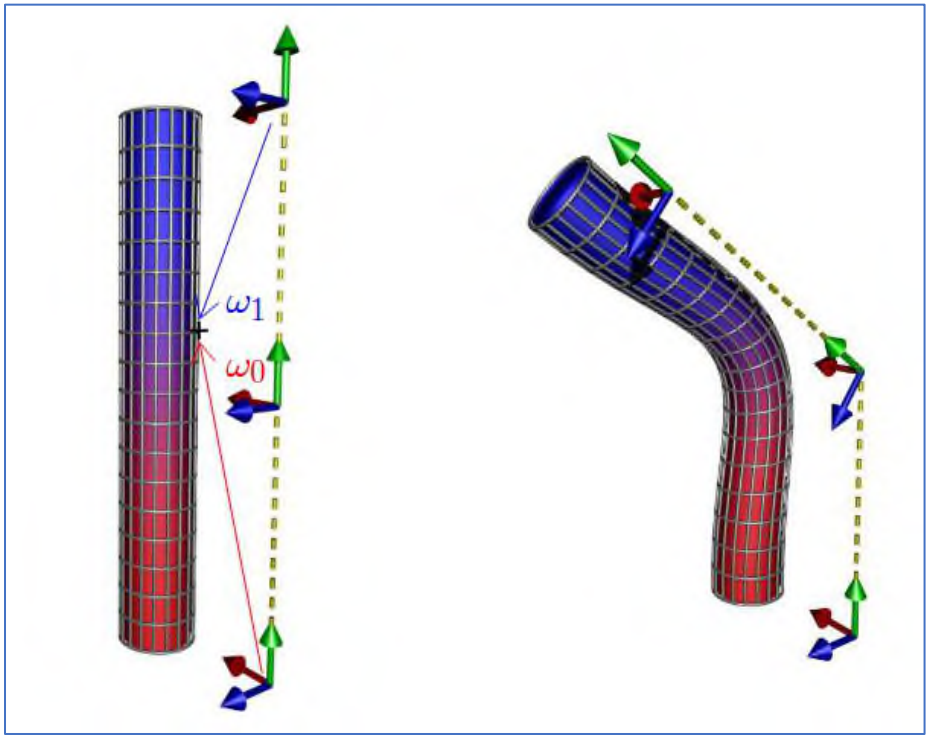


Figure 1-9 : Exemple de déformation par enrobage lisse

Dans le tableau 1.6, nous avons cité quelque avantages et inconvénients de la méthode d'enrobage lisse.

Avantages	Inconvénients
– Cette méthode est devenue un outil de déformation standard dans les logiciels professionnels à cause de son implémentation facile et l'efficace. – L'utilisation d'une hiérarchie similaire à une structure anatomique de squelette humain est très intuitive pour la déformation d'un personnage articulé. – Le paramètre de poids d'enrobage offre à l'utilisateur un contrôle sur l'apparence de la déformation finale.	– La déformation produit une perte de volume local visible dans des surfaces fermées telles que les parties du corps (Figure 1.10). Cet artefact est connu sous le terme de *collapsing-elbow effect*.

Tableau 1-6 : Avantages et inconvénients de l'approches déformation par enrobage lisse

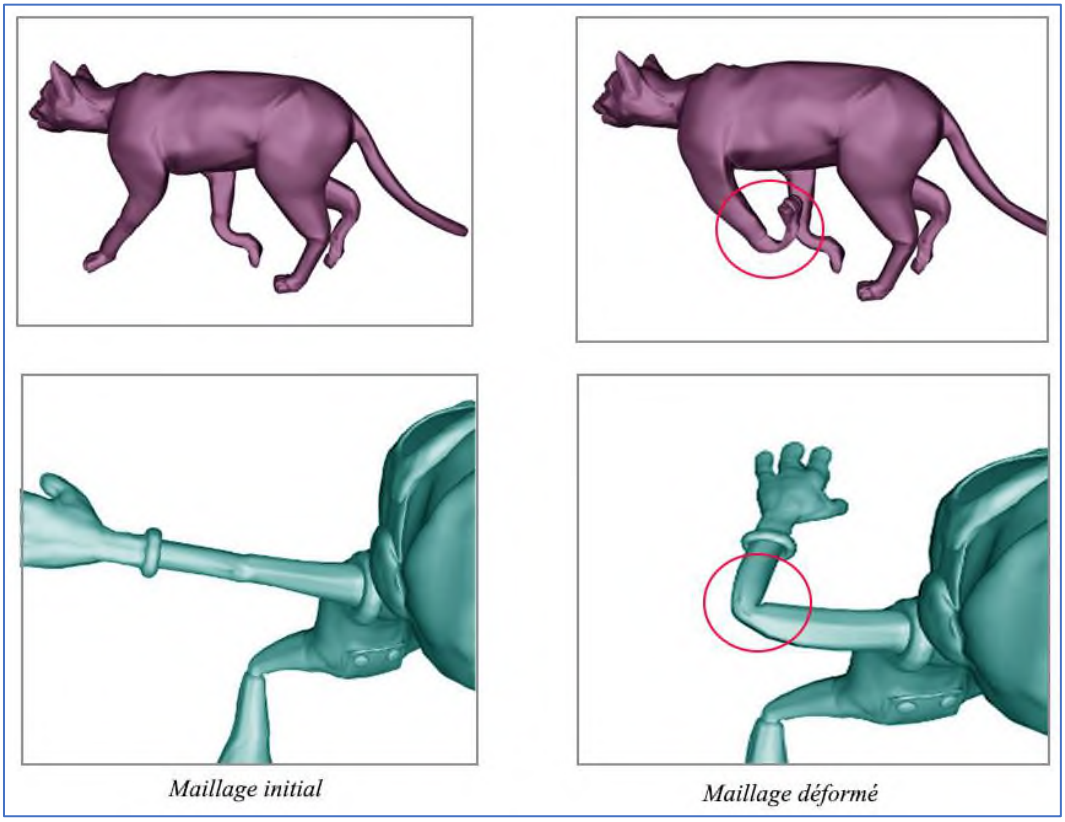


Figure 1-10 : Exemple de l'effet de "collapsing elbow" indiqué par les cercles rouges

Pour surmonter les problèmes liés à l'enrobage lisse, les artistes font recours à une manipulation des poids d'enrobage en exerçant des interpolations plus précises au niveau des articulations. Cependant, la réalisation de ce type de poids demande plus de temps et d'expertise. En effet, quoique les logiciels professionnels de modélisation offrent la possibilité d'appliquer directement les degrés d'influence de poids de l'articulation sur les sommets du maillage, les contraintes de normalisation des poids due à la combinaison barycentrique qui rendent leur manipulation plus difficile.

Dans le cas d'un personnage articulé, certaines rotations ne sont pas faciles à modéliser en utilisant l'approche d'enrobage lisse LBS. Par exemple, dans le cas d'une rotation d'angle 90° du bras autour de son axe, l'interpolation engendrée par l'enrobage LBS projettera tous les sommets vers le centre de l'articulation ce qui provoque artéfact connu sous le terme *d'emballage de bonbons* (Figure 1.11). Ce problème est généralement causé par l'expression d'interpolation de la méthode de d'enrobage LBS (annexe.). L'interpolation utilisée est une expression linéaire de matrice de rotation qu'est une opération instable dans l'espace de rotation.

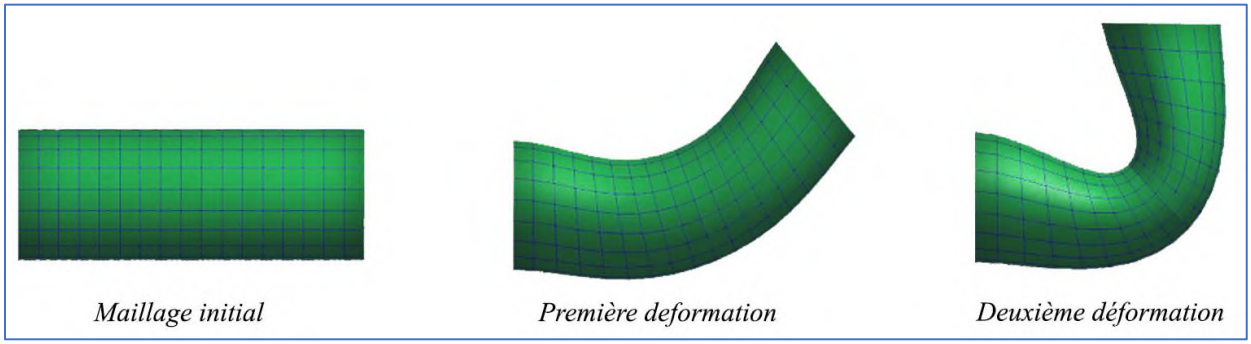


Figure 1-11 : Déformation d'un modèle de cylindre en utilisant méthode du LBS

1.4.3.3. Approches d'amélioration de l'enrobage lisse

Pour surmonter le problème d'interpolation dans la méthode d'enrobage LBS, plusieurs approches ont été proposées. On distingue principalement deux catégories d'approche :

1.4.3.3.1. Approches basées sur l'apprentissage

L'approche proposée par Lewis *et al.* [89] utilise des échantillons de forme définis par des experts (artistes) pour un certain nombre de postures du squelette. Ensuite la déformation est effectuée à l'aide d'un vecteur de correction appliqué aux coordonnées des sommets de modèle déformé de manière à minimiser l'écart aux formes de références. Sloan et al. [131] proposent une approche similaire, mais en adoptant le principe de stocker les formes d'échantillonnage dans l'espace des formes de repos modifiées. Cependant cette approche est couteuse en mémoire lorsque le nombre de pose de déformation est énorme. Afin de limiter ce coût, la méthode nommée *Eigenskin* [82] introduit une analyse spectrale comme post traitement pour extraire les principales composantes de la correction nécessaire pour la correction de la déformation. Pour le cas d'une déformation interactive, Rhee et al. [118] proposent une implémentation de l'expression d'interpolation et sa correction sur GPU.

1.4.3.3.2. Approches de correction du volume

La proposition de Yang et Zang [151] modifie la déformation par enrobage pour le cas de surface sous forme de tube guidée par une seule articulation. L'idée principale de cette méthode est de donner à l'artiste la possibilité de définir les poids d'interpolation ainsi qu'une fonction de l'angle de pliage, afin de contrôler la déformation des sommets et minimiser les chances de production de l'effet de collapsing-ellbow.

Au lieu de se limiter à un cas particulier d'objet, d'autres approches proposent des opérateurs de déformation stable dans l'espace de rotation. Magnenat-Thalmann et al. [100] proposent une interpolation à base d'une combinaison linéaire de transformations (figure 1.12).

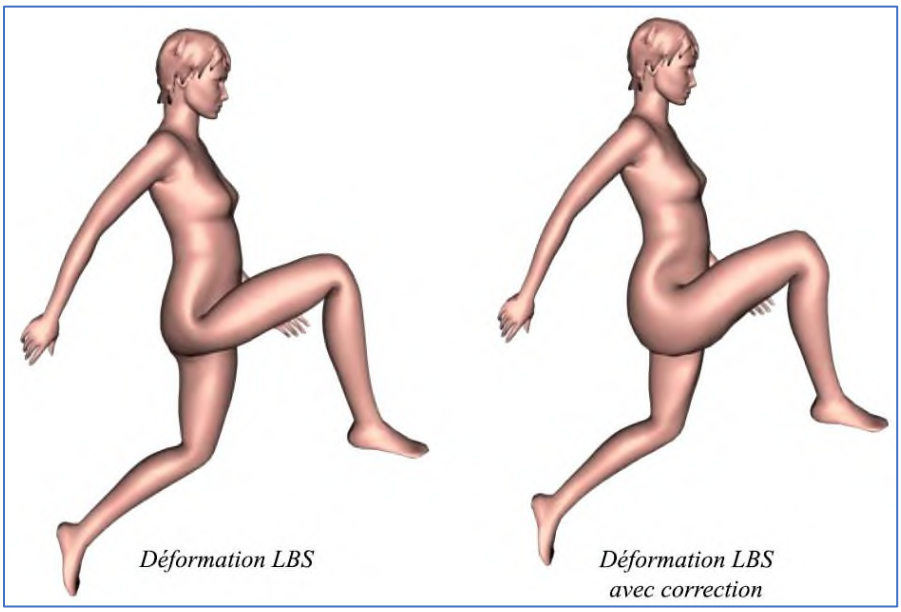


Figure 1-12 : Exemple de correction de déformation LBS

L'avantage de cette approche consiste en sa généralité de traitement de toutes les matrices (rotation, translation, agrandissement, …). Cependant, elle n'est pas préférable pour l'enrobage en temps réel. Pour surmonter ce problème de temps de calcul, Kavan et Zára [74] proposent une approche d'enrobage par mélange sphérique (Spherical blend Skinnig), qui est basée sur l'utilisation d'interpolation dans l'espace des quaternions. Bien que cette approche soit plus rapide, le traitement particulier des centres de rotations fait perdre une partie de l'avantage d'utilisation des quaternions.

Les mêmes auteurs ont proposé plus tard, une nouvelle approche unifiée qui permet de traiter directement les translations et les rotations Kavan et al. [75] (figure 1.13). Cette approche connue sous le terme d'enrobage par quaternions duaux (*DQS : dual quaternion skinning*) est une expression généralisée des quaternions qui prend en considération, d'une manière duale, les rotations et les translations (Annexe…).

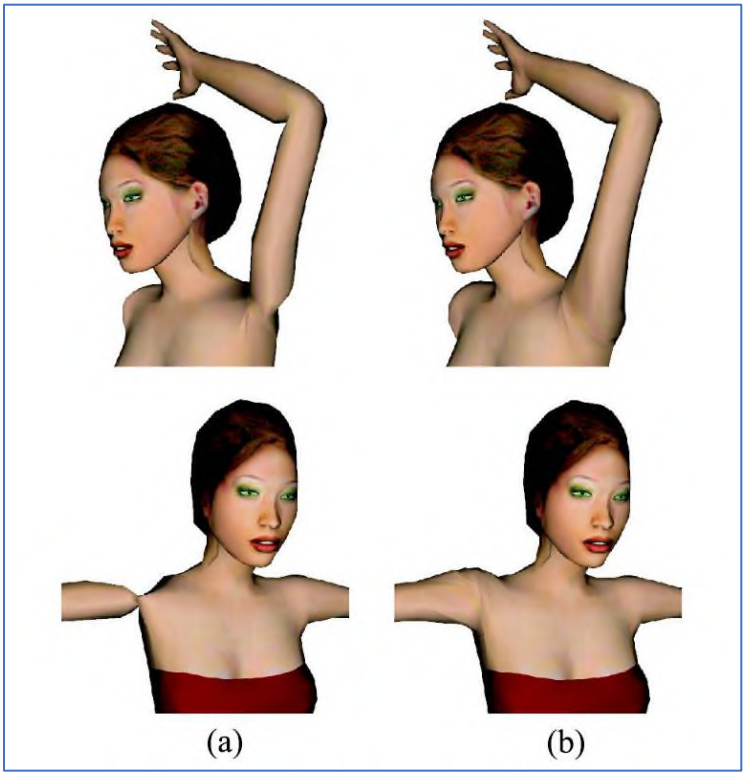


Figure 1-13 : Résultats de déformation ; (a) Enrobage LBS ; (b) Enrobage par quaternions doubles

L'interpolation à l'aide d'enrobage DQS offre une expression générale qui peut être calculée à vitesse interactive. De plus, cette expression facilite l'implémentation de l'interpolation sur carte graphique programmable. Cette approche d'interpolation est désormais devenue un standard dans les logiciels professionnel de modélisations. Bien que l'interpolation DQS présente moins de défauts de déformation que l'interpolation linéaire LBS, elle ne permet pas de définir une déformation à volume constant. De plus, cette approche est pratiquement très sensible aux choix des poids d'enrobage. Récemment, des méthodes de correction d'enrobage DQS ont été proposé. [138, 139] effectuent un enrobage par DQS dans une première étape, puis ils fixent les artefacts dans une seconde étape en considérant les intersections ou l'élasticité globale du modèle déformé.

Bien que les méthodes de skinning soient largement étudiées pour la production d'animation de personnages. Elles sont également utilisées dans un cadre général d'animation d'objets non articulés. Dans ce cas, le squelette d'animation est formé par un nombre de repères sans les organiser en structure hiérarchique. Ainsi, on peut définir une déformation d'espace pour n'importe quel objet [72,68,50]. Un cas particulier de ce type d'approche, pour la déformation de tissus [77,78] est illustré sur la figure 1.14.

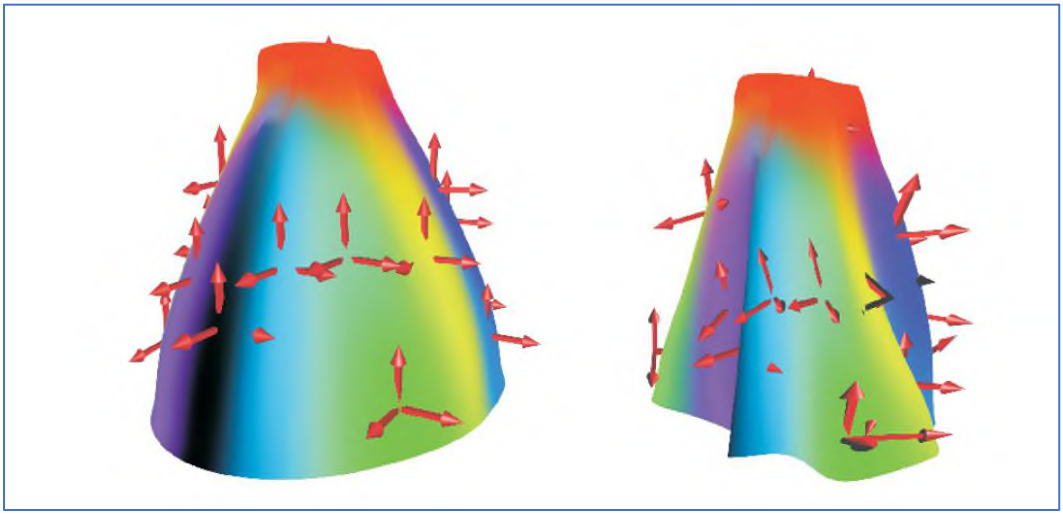


Figure 1-14 : Exemple du maillage du vêtement déformé en utilisant des repères non hiérarchiques

1.4.3.4. Calcul des poids d'enrobage

Comme nous avons vu précédemment, la déformation par enrobage nécessite de définir des poids d'influence des os sur les sommets de l'objet. Ainsi, il peut être défini automatiquement en utilisant les méthodes d'apprentissage citées précédemment. Cependant, ces méthodes d'apprentissage se révèlent moins pratiques que les méthodes d'enrobage standard. Pour cela, Il est nécessaire de définir manuellement ou de manière géométrique ces poids.

1.4.3.4.1. Définition manuelle

Les outils professionnels de modélisation offrent des méthodes plus génériques qui consistent à définir directement les poids d'enrobage sur la surface de l'objet à déformer. Ces outils ont pour avantage de laisser une grande liberté artistique lors de la modélisation. Des artistes experts possèdent des capacités de manipuler ce type des outils. Cependant, la normalisation des poids qui caractérise l'interpolation convexe rend cette manipulation moins intuitive. En effet, une simple modification d'un poids pour un os affecte directement les autres os attachés à celui-ci. Finalement, la création d'une répartition de poids homogène à l'aide de cette manipulation est très difficile. Bien que parfois les manipulations manuelles s'avèrent indispensables, le calcul automatique de poids permet d'éviter des tâches fastidieuses de définition de poids sur l'ensemble de la surface.

1.4.3.4.2. Distance au squelette

Dans la modélisation, les poids d'enrobage sont habituellement reliés à la distance cartésienne des sommets de l'objet au squelette d'animation. Par exemple, soient v un sommet de l'objet à

déformé, j un os du squelette d'animation et d_j la plus courte distance entre v et j. Les poids β_j d'enrobage pour ce sommet sont calculés par la formule suivante :

$$\beta_j = \left(\frac{1/d_j}{\sum_{i=1}^{N_j} 1/d_i} \right)^m \quad (1.11)$$

avec $m \in [1,10]$ un paramètre pour contrôler la vitesse de transition d'influence entre les os et N_j est le nombre d'os du squelette.

Nous pouvons noter que cette méthode n'est pas optimale pour le cas des os proches spatialement et qui influencent des parties indépendantes de l'objet. Pratiquement, si on utilise cette méthode pour l'animation d'une main virtuelle, les doigts de la main risquent de s'influencer les uns aux autres comme illustré sur la figure 1.15, on remarque que l'os en rouge influence l'articulation encerclée en vert.

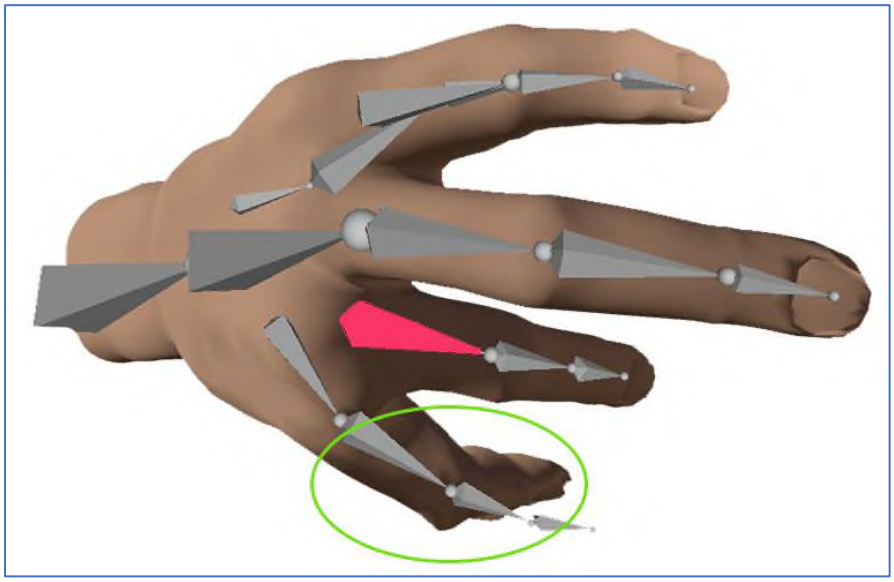


Figure 1-15 : Main virtuelle déformée par enrobage avec une distribution des poids non appropriés

Pour surmonter ce problème d'influence entre l'os et les sommets qui ne lui sont pas associés, Baran et Popovic [16] proposent une méthode de modification de la distance cartésienne basée sur l'équation de diffusion de la chaleur. La figure 1.16, illustre un exemple de diffusion de l'influence des poids.

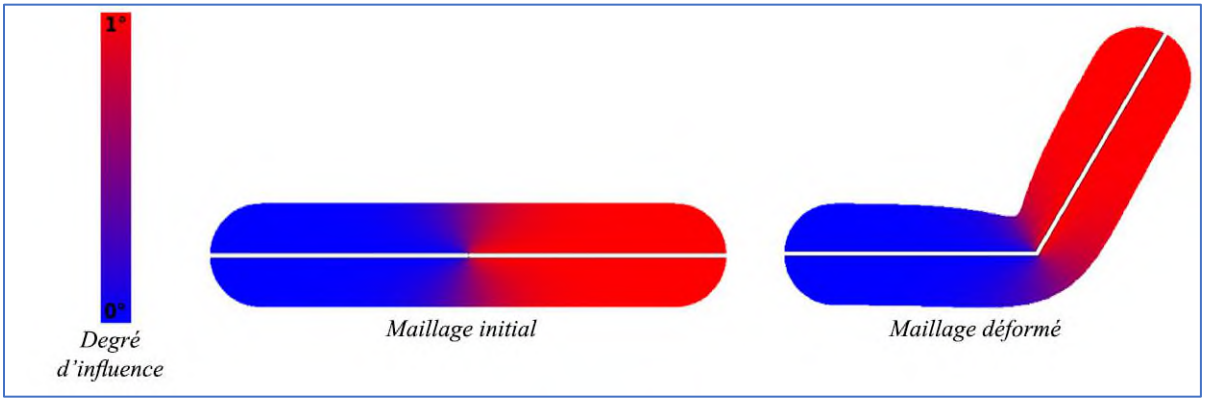


Figure 1-16 : Illustration de diffusion de poids d'enrobage par équation de la chaleur sur un cylindre ; Exemple issu de la proposition de [16]

Cette méthode est très optimale pour avoir une bonne approximation dans le cas d'un objet avec une forme simple ; ceci par l'introduction d'une pénalité sur la distance volumique qui permet de prendre en considération la structure géométrique de la surface à l'aide de calcul d'intersection [16]. Cependant, le calcul d'intersection demande parfois un temps de calcul très crucial, ce qui présente un cout très élevé pour une telle méthode. Ainsi, pour un objet avec une forme géométrique relativement complexe, c'est-à-dire un objet possédant des concavités comme le cas d'une main humaine, il est pratiquement difficile d'utiliser cette méthode pour initialiser correctement les poids d'enrobage. On note également que Weber et al. [144] proposent une méthode similaire, mais en adoptant un enrobage rigide uniquement. Hetroy et al. [62] proposent une méthode de calcul automatique de poids pour des surfaces construites à l'aide des formes cylindriques.

1.4.4. Déformations à base de modèles

Dans ce paragraphe on va présenter quelques approches standard de déformation à base de modèles. L'idée derrière ces approches est de construire un ensemble de formes à l'aide d'un nombre réduit de paramètres. En modifiant la combinaison de ces paramètres, on obtient un espace de formes.

On distingue deux approches dans cette catégorie :

- L'interpolation directe de formes de bases.
- L'extraction d'informations par apprentissage.

Le principal avantage de cette catégorie d'approche consiste en sa capacité de créer des déformations arbitraires et complexes à l'aide d'un faible nombre de paramètres. Cependant, la

difficulté principale étant d'avoir un contrôle intuitif sur les paramètres définis pour décrire les déformations souhaitées. On décrit dans la suite les deux approches de cette catégorie ainsi que ces applications dans le processus de déformation. Cependant, nous n'allons pas réaliser une étude approfondie des publications dans ce cadre.

1.4.4.1. Interpolation de formes

L'interpolation de formes (*Morphing*) est basée sur l'idée de concevoir un certain nombre de formes prédéfinies appelées formes clés. Cette méthode de déformation est largement utilisée dans l'animation de visage humain [88,10,79]. En effet, la déformation faciale est connue par sa complexité de modélisation, et en plus l'œil humain est très sensible aux défauts qui peuvent être engendrés par cette déformation. Ainsi, il est optimal de choisir dans l'ensemble prédéfini des formes et de valider le choix à chaque fois, au lieu de créer la déformation à l'aide des outils de déformation géométrique. Cependant, cette interpolation (linéaire ou polynomiale) ne permet pas de préserver les détails originaux de l'objet déformé, elle est particulièrement dépendante des caractéristiques des formes prédéfinies. Par conséquent, les artistes modélisent manuellement un grand nombre de formes pour générer la déformation nécessaire. Par exemple, dans le film d'animation *Le Seigneur des Anneaux*, la modélisation du personnage de *Gollum* a nécessité l'utilisation de 675 formes clés [47].

1.4.4.2. Méthodes d'apprentissage

La déformation par des méthodes d'apprentissage est exécutée en deux étapes : La première étape est considérée comme une étape de pré-traitement, elle consiste à extraire des informations spécifiques depuis des formes données en entrée. La deuxième étape consiste à générer les déformations de l'objet à déformer en prenant en compte ces informations extraites. Cette méthode est définie comme une généralisation de l'interpolation de forme. En utilisant cette méthode on n'aura pas besoin de stocker en permanence la totalité des formes de bases, mais on retient seulement les informations nécessaires pour la déformation.

Pour l'application de ces méthodes d'apprentissage dans le cas d'animation des personnages articulés, certains auteurs se basent sur un modèle généré à l'aide d'enrobage standard, ensuite ils améliorent ce modèle à l'aide des informations issues des formes d'apprentissage. Certaines approches extraient des informations numériques depuis une décomposition en composantes principales [82, 143, 149], ce qui permet de créer des déformations arbitraires, mais ces

composantes principales restent très difficiles à manipuler. Yang et al. [151] proposent une approche à base des fonctions associées à la pose géométrique par régression. Cette approche est aisément manipulable mais le modèle résultant est moins générique. Un exemple décrivant cette méthode est montré sur la figure 1.17. On peut remarquer l'effet du gonflement des muscles au niveau d'articulation des bras.

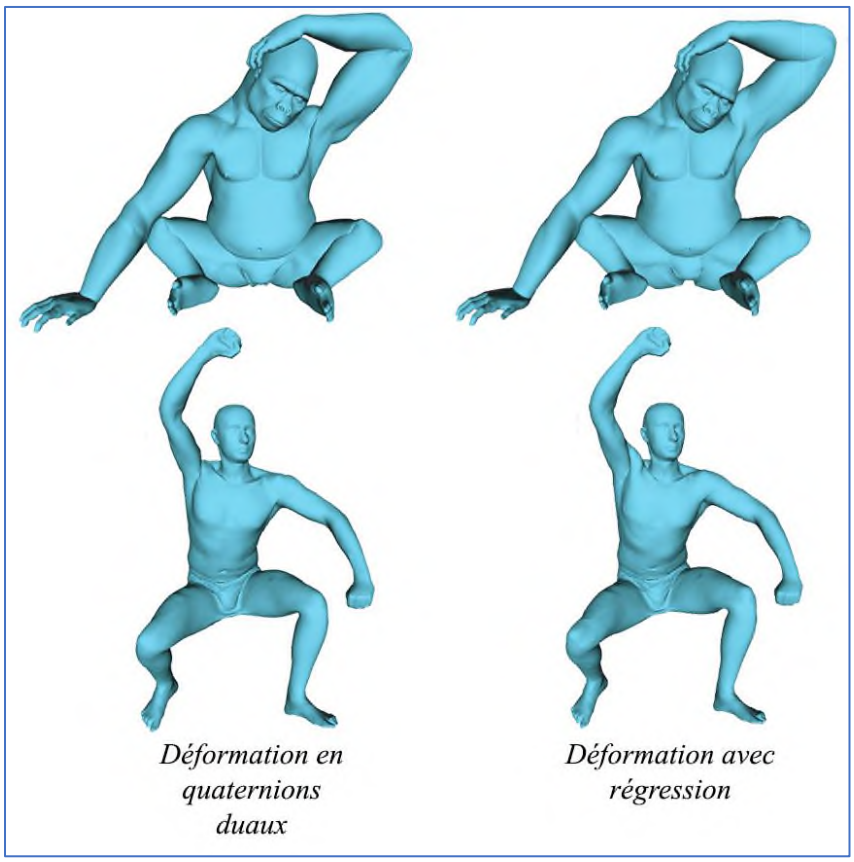


Figure 1-17 : Résultats de méthode d'apprentissage proposée par [151] appliquée sur des caractères animés

Certaines approches d'apprentissages récentes sont utilisées également dans la modélisation en temps réel des animations de vêtements avec des plis [140,59,71]. Comme avantage, ces approches permettent une animation rapide et assurent une apparence plausible de la surface déformée. Cependant, leur utilisation est liée à deux problématiques principales :

- Faible contrôle sur la surface déformée.
- La création de la base de données des formes d'apprentissage.

En effet, toutes les déformations générées à l'aide d'une telle méthode doivent forcements appartenir à l'espace des formes de base ou d'apprentissage. Par exemple, une base de formes de

personnage articulé qui marchent ne sera pas possible d'être utilisée pour générer un mouvement de course. Par conséquent, il est nécessaire de concevoir l'ensemble des formes pour chaque type de déformation, ce qui rend ces approches peu applicables pour la génération des déformations arbitraires.

1.4.5. Déformation directe de surfaces

Ce type de déformation est basée sur l'idée d'analyser les caractéristiques de la surface de l'objet afin d'en décider le type de la transformation la mieux adaptée. À l'aide d'une telle approche, l'artiste peut choisir le type de la déformation en fonction des caractéristiques de la surface. Ainsi par exemple, une surface cubique ne sera pas transformée de la même façon qu'une surface plane. Bien que cette catégorie d'approche de déformation assure un contrôle direct sur la surface pour le cas de modélisation de formes libres, elle est moins adaptée pour le cas d'animation des personnages articulés, et les méthodes de simulation pour l'animation de vêtements. Dans la suite nous allons présenter deux méthodes de cette catégorie ainsi que leurs applications.

1.4.5.1. Déformation par subdivision de surfaces

La méthode de subdivision est devenue un outil standard dans les logiciels de simulation graphique, elle est utilisée principalement dans la modélisation multi-échelle. Dans le contexte d'une déformation et animation, l'intérêt de cette méthode consiste en sa capacité de manipuler parfaitement des maillages d'une forme grossière, ainsi d'appliquer la déformation sur l'ensemble des résolutions fines du maillage. Cette méthode offre ainsi la possibilité d'effectuer une déformation sur différents niveaux de détails du maillage : la déformation d'une partie du corps de personnage ou la déformation locale d'un muscle (figure 1.18). La modélisation par surface de subdivisions est initiée par Catmull et al. [31] et Loop et al [97] pour le domaine de conception assistée par ordinateur CAO. L'utilisation de cette méthode est introduite par [11, 41] dans la déformation rapide et les logiciels d'animation professionnels.

Le principe de la modélisation par subdivision est principalement itératif en deux étapes :

1. Subdivision de la structure du maillage, indépendamment de la topologie géométrique.
2. Positionner les anciens sommets de la surface et les nouveaux sommets crées dans la première étape, en se basant sur les informations locales des coordonnées des anciens sommets.

Récemment, les surfaces de subdivisions font une partie intégrante dans de nombreux logiciels de modélisation, et plusieurs sujets de recherche sont publiés dans ce contexte [95].

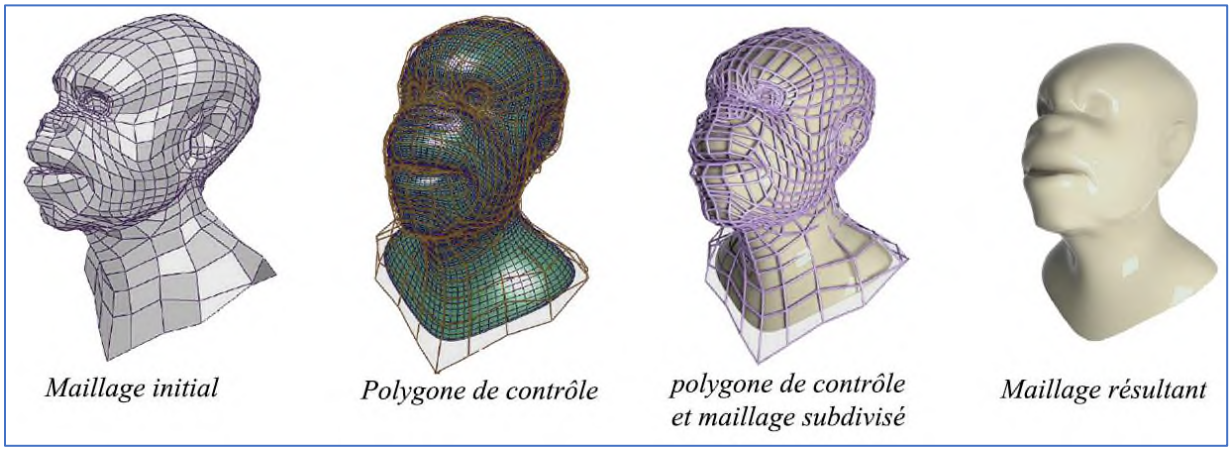


Figure 1-18 : Exemple de processus de subdivision du maillage polygonal

La méthode de déformation à l'aide de subdivision présente quelques inconvénients :

- Les surfaces de subdivision ne disposent pas d'une paramétrisation sous-jacente bien déterminée, ou du moins elle est complexe à calculer. Ce qui rend l'utilisation de ce type de surface impossible pour des opérations classiques comme l'intersection, la découpe ou le raccordement.
- Le résultat d'une opération de subdivision est difficile à contrôler. En effet, ceci dépend des deux étapes de subdivision qui changent le positionnement des sommets ainsi que leur connectivité. Par conséquent, deux surfaces identiques avec une connectivité différente se convergent vers différentes surfaces après une opération de subdivision.
- Finalement, une méthode de subdivision est particulièrement souhaitable en tant qu'étape de post-traitement pour améliorer la qualité de la surface résultante.

1.4.5.2. Déformations par coordonnées différentielles

Une méthode d'encodage de surface en maillage est devenue plus adaptée à réaliser des déformations arbitraires. Le système d'encodage différentiel permet de profiter davantage des géométries différentielles applicables dans le cas des maillages polygonaux. Pour plus de détails de ce contexte le lecteur peut consulter l'étude effectué par Crane Keenan [38].

Le principe de cette méthode est de définir la surface par une représentation intrinsèque au lieu d'utiliser ses coordonnées cartésiennes dans l'espace. Par exemple, la représentation à l'aide de

coordonnées de Laplacienne permet de décrire la surface localement d'une manière différentielle [132,106].

La propriété linéaire des coordonnées différentielles, permet de définir un système global matriciel creux facile à minimiser. Ainsi, en utilisant des algorithmes de résolution de système linéaires creux on peut obtenir le maillage déformé. Par conséquent, les sommets du maillage seront positionnés dans l'emplacement souhaité tout en gardant les propriétés différentielles apportées par les coordonnées de Laplacienne (figure 1.19). Pour approximer plus précisément le Laplacien du maillage, Masuda et al. [103] proposent d'utiliser des coordonnées cotangentes en se basant sur l'idée de Pinkall et Polthier [112].

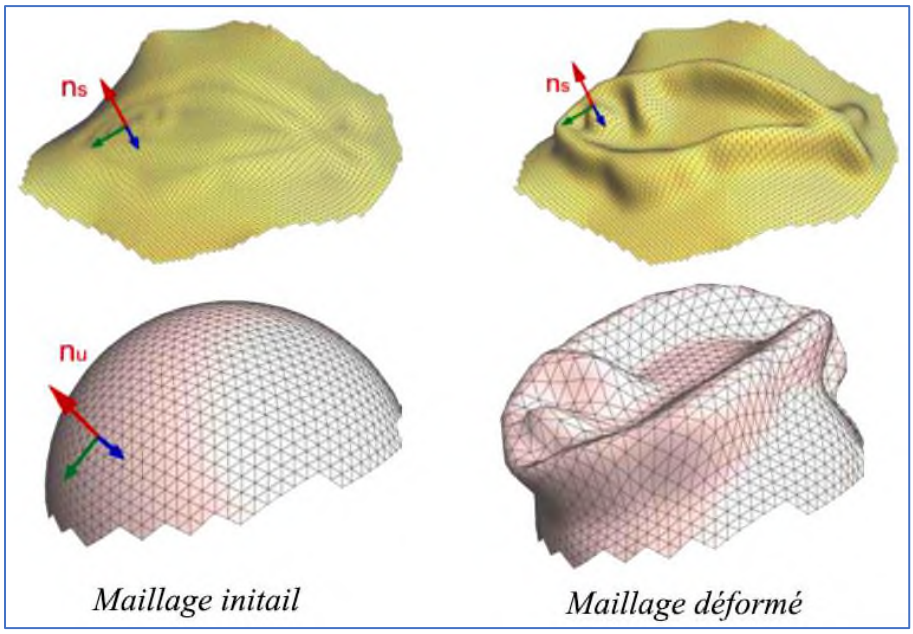


Figure 1-19 : Illustration de déformation basée sur les coordonnées différentielles [132]

1.5. Déformation sous contraintes

Dans les paragraphes précédents, nous avons présenté un certain nombre de méthodes de déformations standard, utilisée dans les outils professionnels afin d'animer des personnages et des objets virtuels. En utilisant ces méthodes, il est impératif que l'artiste réalise un compromis entre l'un des critères suivants :

1. Avoir une plausibilité d'apparence.
2. Avoir une rapidité de réalisation.
3. Être libre dans le contrôle du résultat final.

Bien qu'une déformation effectuée avec des méthodes physiques ou l'enrobage garantie la rapidité d'exécution et un degré de contrôle sur le résultat final, elle n'assure pas la plausibilité visuelle du modèle déformé. En effet, certains aspects géométriques de la surface telle que la préservation du volume, nécessitent des étapes de corrections effectuées manuellement pour avoir le résultat souhaité. Dans l'objectif de faciliter ces tâches de correction fastidieuses, un ensemble de méthodes alternatives ont été proposées. Dans la suite nous présentons certaines de ces méthodes.

1.5.1. Contraintes de longueurs

Les vêtements sont des objets particuliers, ils sont particulièrement constitués d'un enchevêtrement de fibres inextensibles. Ils possèdent la propriété de ne pas ni s'étendre ni se contracter. Une modélisation plausible d'un vêtement virtuel repose sur la présence des plis qui apparaissent et disparaissent dynamiquement au cours de l'animation (figure 1.20).

Dans la suite nous traitons les méthodes de préservation de longueur qu'ont pour objectif la modélisation de tissu virtuel en animation, tout en résolvant la problématique suivante : simuler et déformer d'une manière optimale les vêtements avec des plis dynamiques. Ainsi que les plis résultants soient générés par une approximation de préservation de longueur.



Figure 1-20 : Modèles de vêtements virtuels utilisés en production cinématographique et jeux vidéo ; (À gauche) image issue de film d'animation Tangled [133] ; (À droite) image issue de jeu vidéo Assassin's Creed Syndicate [159]

1.5.1.1. Définition et caractéristiques des isométries

1.5.1.1.1. Définition d'isométrie

Les vêtements en générale sont créés à l'aide de patron de forme planaire. Ainsi on peut considérer un tissu virtuel comme étant une surface 3D générée par la transformation d'un plan

D (patron) en surface S. Cette transformation est effectuée à l'aide d'une fonction isométrique g :

$$g\begin{cases} D \in \mathbb{R}^2 \to S \in \mathbb{R}^3 \\ p(x,y) \to g(p) \end{cases} \quad (1.12)$$

Une fonction est dite isométrique si elle préserve les longueurs, c'est-à-dire que toute courbe dans le plan D est transformée en courbe de même longueur dans la surface S (figure 1.21).

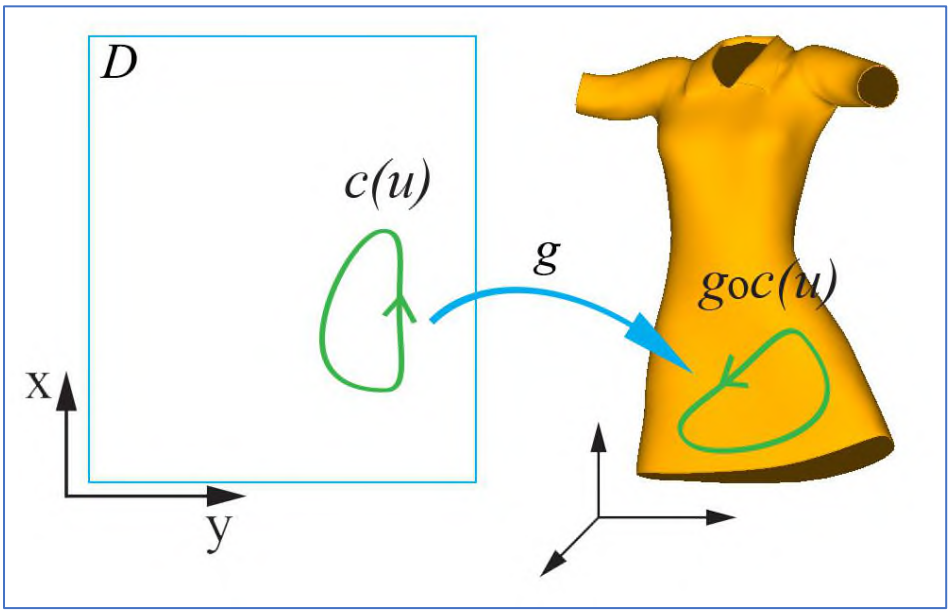


Figure 1-21 : Transformation d'une courbe dans le plan en courbe dans la surface de vêtement

Pour le cas d'un maillage triangulaire, on peut exprimer l'isométrie de manière équivalente par le respect des longueurs des arêtes des polygones : soit A l'ensemble des arêtes d'un maillage triangulaire. Pour tous $(i,j) \in A$ la fonction isométrique g est définie par :

$$\|p_j - p_i\| = \|g(p_j) - g(p_i)\| \quad (1.13)$$

La mesure permet de calculer seulement le taux de préservation globale de l'isométrie et non pas la préservation locale. On note qu'elle s'adapte directement à la déformation à base de modèle masses-ressorts (paragraphe 1.3.2). Ainsi qu'elle est dépendante de la triangulation sous-jacente.

1.5.1.1.2. Définition de surface développable

Une surface développable est définie comme étant une surface isométrique qui possède une courbure Gaussienne nulle en tout point [83]. Les caractéristiques qui définissent une surface développable S sont les suivantes :

1. Il existe une fonction g isométrique avec une continuité C^2.
2. La fonction $g : D \to S$ peut s'exprimer par la forme suivante :

$$\begin{cases} g(u,v) = f_1(u) + vf_2(u) \\ \det\left(f_1', f_2, f_1'\right) = 0 \end{cases} \qquad (1.14)$$

   C'est-à-dire que S est une *surface réglée* qui est générée à l'aide d'une droite ou une courbe qui se déplace dans l'espace selon une règle donnée à priori.
3. La courbure Gaussienne est nulle en tout point.

Pour le cas d'un maillage polygonal, on utilise une courbure de Gauss discrète [38]. Un maillage représenté à l'aide d'une approximation de surface développable peut être décrit entièrement sans aucun sommet intérieur. En effet, les arêtes pouvant se placer sur les règles de la surface, les sommets du bord et leurs connectivités définissent entièrement cette surface [123].

En se basant sur les définitions (préservation d'isométrie ou de surface développable) plusieurs approches de modélisation et d'animation ont été proposées dans le domaine graphique.

1.5.1.2. Animation de plis de vêtements

Les vêtements virtuels sont devenus plus présents dans le domaine de cinéma d'animation et des jeux vidéo. Au cours des dernières décennies, la simulation du comportement des vêtements portés par les caractères des personnages virtuels a été un sujet intéressant pour la communauté de recherche graphique. Les plis des vêtements représentent un phénomène mécanique complexe. Ce phénomène est caractérisé par des comportements non linéaires et par un niveau de dynamique très élevé. En dépit de multiples années de recherche, la modélisation efficace et réaliste de déformation de tissu reste complexe. Le standard dans l'informatique graphique pour effectuer une modélisation ou une déformation d'un objet quelconque, est d'utiliser des méthodes basées sur des lois physiques [66]. Ces méthodes peuvent produire des résultats visuellement plausibles, ainsi de calculer des effets dynamiques et de gérer des collisions entre des modèle 3D dans une même scène. Cependant, le temps de calcul nécessaire pour exécuter ces méthodes rend

souvent leur utilisation difficile dans le cadre d'une simulation de plis de vêtements [35]. L'absence de contrôle direct sur la forme finale de plis oblige l'utilisateur à relancer la simulation pour de nombreuses reprises avec différents paramètres afin de se rapprocher du résultat souhaité.

Actuellement, de nombreuses approches ont déjà été proposées dans l'objectif de générer des vêtements inextensibles avec des plis. Ces approches peuvent être classées en trois catégories principales : des méthodes basées sur l'ajout de contraintes supplémentaires dans une simulation physique, des méthodes à base d'optimisation globale et les méthodes géométriques.

1.5.1.2.1. Méthode basée sur ajout de contraintes

La méthode proposée par [115] est l'une des méthodes physiques avec des contraintes supplémentaires pour la modélisation de vêtements virtuels. Cette méthode est basée sur le principe d'introduire une contrainte de limitation d'extension des longueurs des arêtes du maillage en masses-ressorts, cela est effectué à l'aide d'une projection géométrique itérative des sommets. Cette méthode est facile à implémenter, par contre la convergence de la projection géométrique n'est pas optimale.

Une approche de résolution appelée *(FPM Fast projection method)* proposée par Goldenthal et al. [52] pour améliorer la notion de projection géométrique en l'intégrant avec la multiplication de Lagrange. Cette approche permet de générer des maillages avec des plis et possède une isométrie approchée comme il est illustré sur la figure 1.22.

Kang et al. [73] proposent une approche de génération de plis sur un maillage à basse résolution. Le principe de cette méthode est d'utiliser une variation sinusoïdale sur des splines sous forme de carreau. Larboulette et Cani [85] ont adopté une approche similaire avec des courbes paramétriques de plis. Cependant ces deux approches précédentes ne garantissent pas la préservation de longueur.



Figure 1-22 : Simulation quasi inextensible de deux modèles de vêtements [52]

Muller et al. [108] proposent une approche basée sur l'introduction d'un second solveur pour déplacer les sommets du maillage après une subdivision afin de préserver la contrainte de longueur. [78] proposent une méthode de simulation de tissu hiérarchique, qui combine la simulation physique conventionnelle avec des réseaux de neurones profonds.

Récemment, Li et al. [90] proposent une méthode pour gérer le contact du tissu basé sur le frottement coulombien exact. Cette méthode permet de créer des plis de tissu en traitant les interactions tissu-tissu et tissu-corps. Ces méthodes génèrent des résultats des plissements impressionnants et modélisent divers types de vêtements avec une grande précision (figure 1.23). Cependant, ces résultats nécessitent des compétences spécifiques de la part de l'utilisateur pour régler les paramètres physiques, et ils sont très coûteux en calcul.



Figure 1-23 : Simulation de vêtements à l'aide de frottement coulombien exact [90]

1.5.1.2.2. Méthodes basées sur l'optimisation

D'autres approches utilisent une optimisation d'énergie évaluant la développabilité de la surface de tissu. Elles permettent d'obtenir des plis qui sont visuellement plausibles et assurent un contrôle aisé du résultat final. Dans ce cadre, Wang et Tang [141] proposent de modéliser une surface quasi-développable à partir d'une surface, en utilisant une minimisation d'énergie basée sur l'erreur de courbure de Gauss. Chen et al. [33] propose une approche similaire dont le principe est d'ajouter des contraintes de positions à la fois sur quelques sommets de la surface résultante, et sur l'action de gravité. Cette approche permet de générer une surface quasi-développable, ainsi qu'elle est manuellement contrôlable, et les plis résultants sont localisés automatiquement (Figure 1.24).

La proposition de Popa et al. [114] introduit une contrainte spatio-temporelle appliquée sur une capture vidéo de vêtements animés. La minimisation dans cette méthode est effectuée sur la propriété de développabilité et sur l'orientation des normales sur les sommets du maillage, en fonction d'une analyse de la vidéo d'entrée. Cependant, une telle approche d'optimisation est excessivement coûteuse en termes de temps de calcul, en plus elle requit une vidéo en entrée.

On note que ces approches basées sur l'optimisation apportent à l'artiste un degré de contrôle bénéfique sur la forme générale de la surface générée par rapport aux autres approches de simulation physique pure. Cependant, elles sont coûteuses en temps de calcul et en mémoire du travail, ainsi que le contrôle direct sur la forme locale des plis reste encore difficile.

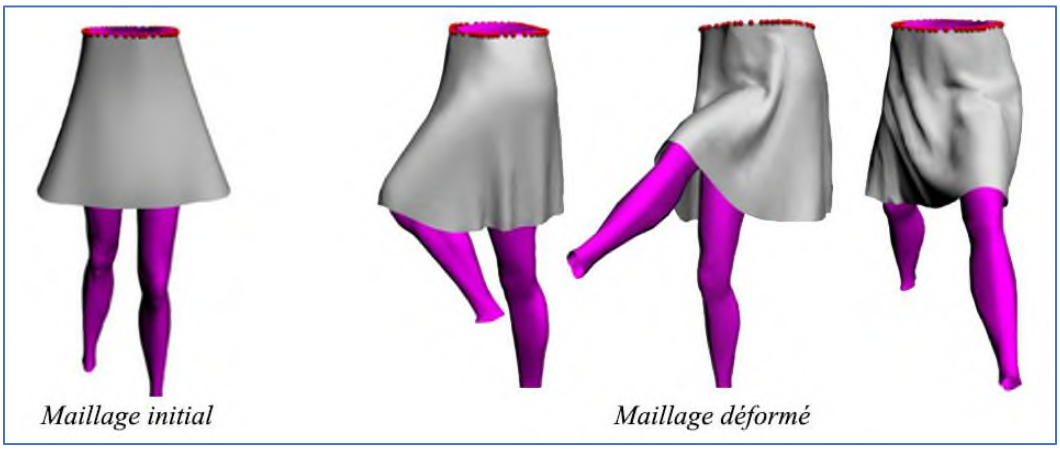


Figure 1-24 : Déformation par optimisation d'un modèle de jupe [33]

1.5.1.2.3. Méthodes géométriques

Les approches géométriques sont proposées afin de réduire le cout de calcul de l'ajout de plis sur la surface des vêtements virtuels. Elles reposent sur le principe de générer ces plis à partir des informations géométriques de la surface.

- ***Simulation de plis à l'aide des formes géométriques prédéfinies***

Decaudin et al. [40] proposent une approche procédurale qui permet d'enrouler des plis autour d'une surface de tissu en forme cylindrique. Ceux-ci sont alors générés sur le maillage par une déformation connue d'avance. Cette approche est applicable en temps réel, ainsi elle assure à l'artiste un contrôle sur la forme finale des plis générés. Cependant, elle est adaptée seulement aux vêtements ayant un maillage de forme cylindrique, ainsi qu'elle ne peut pas modéliser certains types de plis causés par des déformations spécifiques comme la compression ou la torsion (figure 1.25 (a)).

Récemment, Han et al. [60] proposent une méthode basée sur des réseaux de neurones convolutifs pour l'intégration des plis issus des images de vêtements réelles. Cependant, cette méthode est limitée par l'information issue de l'image statique et la position fixe de caméra. En effet, elle ne fournit pas un rendu 3D parfait du maillage de vêtements. Santesteban et al. [124]

proposent un modèle basé sur l'apprentissage des plis suivant la dynamique du corps. Cependant une telle méthode d'apprentissage est limitée par la taille de la base des échantillons utilisée.

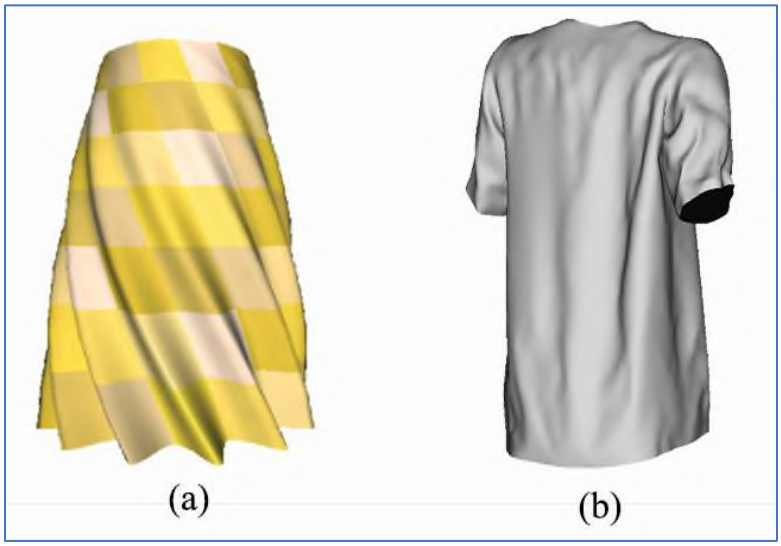


Figure 1-25 : Plis simulés sur deux modèles de vêtement ; (a) Exemple issu de [40] ; (b) Exemple issu de [80]

– ***Intégration de plis au niveau de texture***

Les approches proposées par [57] et [80] consistent à utiliser une texture précalculée à l'aide d'une carte d'intensité de plis. Cette texture est ensuite appliquée sur le maillage de tissu pour donner l'impression d'un vêtement plissé. Bien que cette approche puisse être appliquée sur une animation du vêtement quelconque, elle requit une interpolation avec une base de textures prédéfinies. La création d'une telle base est ainsi une tache fastidieuse. (Figure 1.25 (b) ci-dessus).

– ***Traçage manuelle de plis***

Cutler et al. [39] proposent une approche d'ajout manuel des plis sur la surface du vêtement. Les plis dans ce cas sont générés à l'aide d'une déformation locale suivant une courbe tracée par l'artiste sur la surface du modèle (figure 1.26). Wang et al. [150] proposent un système de modèle pré-simulé qui permet à l'utilisateur de dessiner l'apparence du vêtement souhaité. Ces méthodes assurent un grand contrôle sur les plis résultants, mais elle demande beaucoup d'expertise pour déterminer l'emplacement adéquat des plis, et pour les animer de manière plausible au cours du temps. En plus, la modélisation manuelle de plis requit toujours un temps très important pour qu'elle soit réalisée.

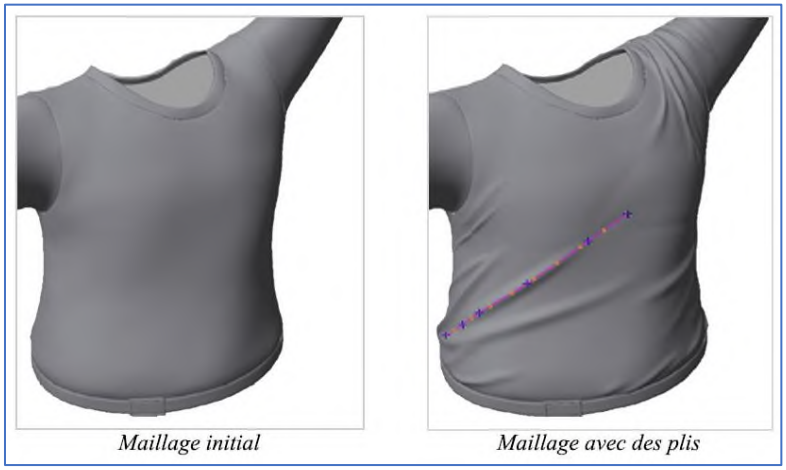


Figure 1-26 : Exemple de courbe de plis dessinés manuellement sur la surface du vêtement [39]

1.5.2. Préservation de volume

La préservation de volume constant lors de la déformation caractérise plusieurs objets réels. Particulièrement, les membres du corps humain et animal maintiennent localement un volume constant à cause de leur constitution (composée principalement de l'eau). Pour avoir une apparence réaliste des personnages virtuels, il est indispensable d'assurer cet aspect de préservation du volume englobé par leur surface [86].

Pratiquement, lors de la déformation d'un objet virtuel, il est difficile d'accéder directement à l'information sur le volume engobé. En plus, la déformation à l'aide des méthodes standard telles que l'enrobage, ne permettent pas la préservation du volume. Certaines propositions adoptent le principe d'ajouter des contraintes géométriques sur la surface de l'objet pour préserver son volume lors de la déformation.

Dans la suite de ce paragraphe, nous détaillons les différentes approches proposées pour surmonter le problème de préservation du volume d'une surface.

1.5.2.1. Déformation de forme libre (FFD)

Les approches de déformation de forme libre s'inscrivent dans le cadre des approches de déformation géométriques. Dans le contexte de préservation de volume, Rappoport et al. [117] proposent une méthode qui permet d'exprimer le volume du maillage à l'aide de fonctions de Bézier. Hirota et al. [63] définissent également une méthode de FFD qui permet de contrôler le volume du maillage à l'aide d'une cage de déformation.

On peut noter que ce genre d'approche assure une préservation de volume global uniquement. Ainsi, une déformation locale peut avoir un rebondissement sur la forme globale de la surface, ce qui n'est donc pas adapté au cas d'animation d'un personnage articulé. En plus, le contrôle d'utilisateur sur la forme finale est très difficile.

1.5.2.2. Manipulation par contraintes

Certaines approches permettent d'introduire une préservation de volume lors de la déformation par surface afin d'améliorer l'apparence visuelle du résultat. Shi et al. [129] proposent une contrainte basée sur optimisation intégrée de la position de squelette d'animation à l'aide de la résolution du système en coordonnées différentielles. Bien que cette approche permet de limiter une perte visuelle volumique trop importante, elle n'assure pas une préservation totale de volume. Zhou et al. [158] introduisent un modèle tétraédrique construit à partir de l'information de la surface, ensuite ils appliquent une minimisation Laplacienne directe sur le volume de l'objet (figure 1.27).

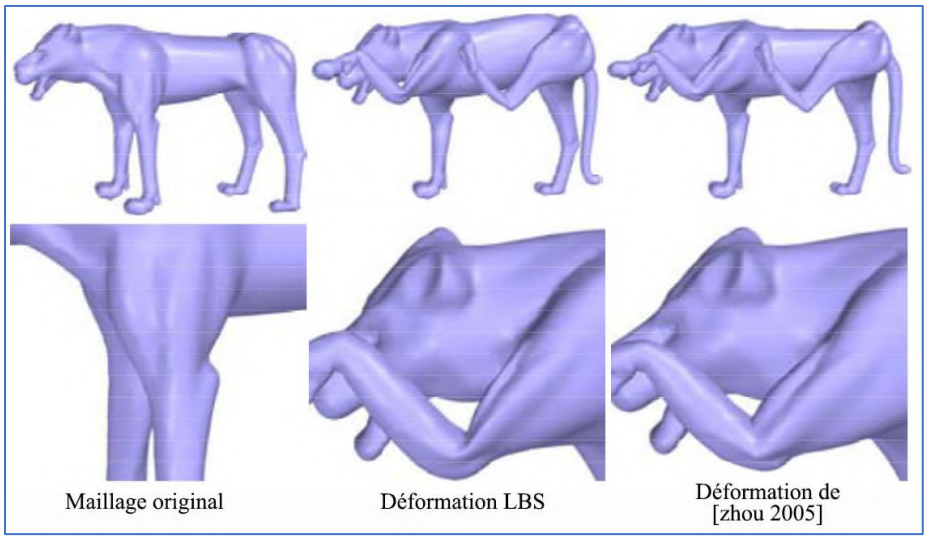


Figure 1-27 : Exemple de préservation de volume par déformation Laplacienne volumique [158]

1.5.2.3. Surfaces implicites à squelette

Cani et al. [29] proposent une méthode pour contrôler le volume d'une surface implicite. La correction de volume est effectuée dans des régions dans lesquelles un nombre de particules sont placées, le degré de correction est défini par l'action de ces particules. Principalement, ces particules sont positionnées au centre de ces régions ainsi que dans les extrémités de l'objet. Lors de la déformation, les positions des particules sont pistées pour déduire la variation de volume de

l'objet. À chaque instant, le champ potentiel générant la surface implicite est déformé suivant une équation différentielle, ce qui permet de limiter la perte de volume. On peut noter que la correction adoptée par cette méthode est très sensible aux erreurs numériques de calcul.

1.6. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté quelques définitions et approches de modélisation et de déformation d'un modèle 3D. Tout d'abord, nous avons détaillé les méthodes de modélisation par surface qui constitue une étape primordiale pour la réussite d'une animation 3D. Ensuite nous avons présenté un état d'art sur les différentes approches de déformations de surfaces. De plus, nous avons expliqué en détail les avantages et les inconvénients de chaque méthode de déformation. Par ailleurs, nous avons abordé les travaux antérieurs réalisés dans le cadre de la déformation avec préservation de propriétés intrinsèques des surfaces particulières, comme les vêtements et la peau.

Chapitre 2

Nouvelle méthode de synthèse de plis sur un maillage de tissu à l'aide des fonctions à base radiale d'Hermite

2.1. Introduction

En dépit de nombreuses années de recherches, la simulation efficace et réaliste de déformation de tissu reste un sujet intéressant pour la communauté de l'informatique graphique. Les détails sur la surface de vêtements représentent un phénomène mécanique complexe. Ce phénomène est caractérisé par des comportements non linéaires et par un niveau de dynamique élevé.

Bien que les approches de déformation physiques permettent de générer des détails dynamiques tout en tenant compte des collisions, la simulation précise de plis nécessite un temps de calcul coûteux. L'animation de plis reste cependant un critère indispensable pour rendre plausible l'apparence des séquences de jeux vidéo et de film d'animation 3D, mais le temps de calcul requis pour réaliser la simulation empêche souvent l'utilisation de ces approches. En effet, la production des jeux vidéo nécessite des systèmes de déformation temps-réel et la simulation basée sur les méthodes physiques n'est pas un choix approprié dans ce contexte. En production cinématographique, le temps de calcul ne soit pas une obligation principale, mais l'absence de contrôle artistique direct du résultat final obtenu, oblige les utilisateurs à relancer les simulations à de nombreuses reprises, avec différents paramétrages, dans le but de se rapprocher des résultats visuels souhaités. Finalement, les approches basées sur les lois physiques brutes demandent un investissement prohibitif en temps machine et en paramétrage manuel des données d'entrée.

Des méthodes de simulation des plis basées sur l'interpolation d'échantillons préexistants ont été proposées en alternative, pour surmonter les problèmes liés aux méthodes physiques [148, 140]. Cependant, ces approches nécessitent un travail artistique fastidieux pour réaliser la base de données de plis. De plus, le contrôle direct du modèle final semble difficile. Ainsi, les méthodes d'augmentation géométriques sont des approches de post-traitement qui utilisent l'analyse de compression pour ajouter des plis au maillage du tissu [43, 122]. Suite à l'étude analytique

présentée dans l'annexe A, ces méthodes nécessitent des compétences spécifiques et beaucoup de temps pour concevoir les motifs de plis. Dans le but d'améliorer ces méthodes d'augmentation géométriques, nous avons proposé une nouvelle méthode de synthèse de plis sur le maillage du vêtement [23].

L'idée de cette proposition est basée sur l'observation que le comportement des plis est fortement lié à la capacité de développement du tissu, et à une quasi-isométrie entre le vêtement et le mouvement du corps. La principale nouveauté de cette méthode est d'utiliser les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF) [99] pour reconstruire une approximation par morceaux du maillage du vêtement. Cette approximation est ensuite employée comme guide de traçage des courbes de plis.

Ce chapitre est organisé comme suit : le paragraphe 2.2 présente un aperçu général de la méthode d'ajout de plis proposée. Le paragraphe 2.3 expose le principe de déformation du vêtement adopté. Dans le paragraphe 2.4, nous détaillons le processus de génération de plis sur le maillage du vêtement déformé. Dans le paragraphe 2.5, nous présentons les résultats des simulations avec la méthode d'ajout de plis ainsi que les comparaisons avec les autres méthodes alternatives.

2.2. Principe général de l'approche d'ajout de plis

Dans ce paragraphe, nous présentons le principe de l'approche de création et animation des détails de vêtements. Une vue générale des différentes étapes de l'approche est présentée sur la figure 2.1. Ce travail est basé sur l'observation que l'apparence des plis dépend largement des impacts que le corps exerce sur la surface du tissu. En fait, l'observateur humain s'attend à ce que des plis apparaissent lorsque la surface des vêtements au niveau des articulations se contracte, et de même à ce qu'elles disparaissent lorsque la surface s'étire après la contraction. Suite à cette observation, nous sommes motivés par l'analyse de la déformation locale et intrinsèque de la surface au niveau des articulations pour prédire l'apparence souhaitée des plis. Pour l'analyse de déformation du vêtement, nous avons utilisé des représentations implicites qui sont connues par leur capacité à détecter des collisions et à modéliser le contact entre des surfaces, ainsi pour leur capacité à être composées par de nouvelles surfaces.

Le pipeline du système proposé est organisé comme suit : les données d'entrée sont un maillage du vêtement porté par un personnage et un squelette d'animation. Le maillage du tissu est partitionné en utilisant une segmentation basée sur la distance des sommets du maillage par

rapport au squelette. (Paragraphe 2.3.1). À partir de ces configurations initiales, nous effectuons une approximation HRBF pour chaque segment du maillage avec une iso-valeur du champ potentiel égale à 0.5 (Paragraphe 2.3.2). Lors de la déformation de tissu, chaque champ potentiel est rigidement transformé et les sommets du maillage correspondants sont déplacés dans la direction du gradient du champ jusqu'à ce qu'ils atteignent leur valeur iso de l'état initial (Paragraphe 2.3.3). En utilisant les angles entre les gradients de ces champs potentiels transformés, nous traçons des courbes de plis cohérents en temps et en espace sur la surface du maillage (Paragraphe 2.4.2). Nous générons ensuite la forme géométrique des plis à l'aide d'une déformation par surface implicite de convolution qui utilise les courbes tracées comme squelette de génération (Paragraphe 2.4.4).

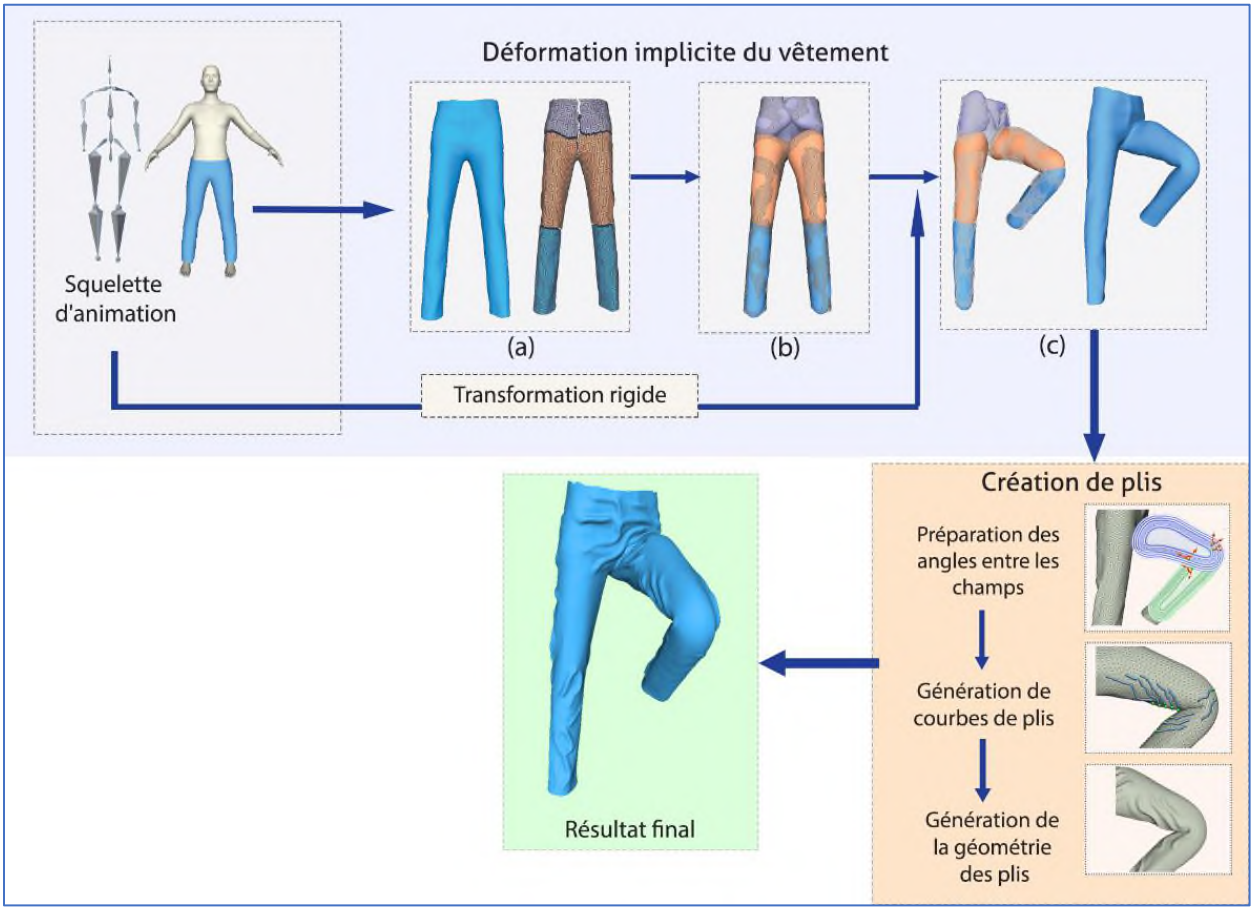


Figure 2-1 : Principe de la méthode d'ajout de plis à un vêtement porté par un personnage animé ; (a) partitionnement du maillage ; (b) l'approximation HRBF ; (c) déformation du maillage

2.3. Déformation implicite de vêtements

La déformation du maillage de tissu en utilisant l'approximation implicite basée sur les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF) est réalisée en quatre étapes :

1. Le maillage du tissu est partitionné en plusieurs régions, ainsi chacune est associée à un os du squelette d'animation ;
2. Les parties du maillage sont individuellement reconstruites en utilisant la méthode HRBF ;
3. Un champ potentiel global est construit par la composition des champs HRBF partiels ;
4. Le maillage est déformé en suivant l'iso-valeur du champ potentiel.

2.3.1. Partitionnement du vêtement

L'objectif principal de cette étape est de reconstruire le maillage du vêtement par morceaux qui sont délimités par les articulations du squelette. Pour cela nous avons besoin de partitionner le maillage initial. La méthode de partitionnement adoptée est inspirée de l'algorithme de Li et al. [91] qui utilisent le squelette d'animation pour en déduire les différentes partitions. Ce processus se déroule en deux étapes :

- **Première étape**

Cette étape consiste à spécifier la visibilité de sommet par rapport aux os du squelette de la manière suivante : soient v_i un sommet du maillage, n_i normale à la surface du maillage en v_i et q_i la projection de v_i sur l'os b_j. On marque v_i comme visible depuis l'os b_j si $\overrightarrow{v_i q_i}.\vec{n} > 0$.

- **Deuxième étape**

Elle consiste à associer tout sommet du maillage avec l'os le plus proche dans le squelette : l'os b_j relatif à un sommet v_i est déterminé en minimisant la valeur d_i qui exprime la distance entre cet os et ses sommets visibles. Cette distance est calculée en utilisant la formule suivante :

$$d_i = \left\| j_1 + r_i \left(j_2 - j_1 \right) - v_i \right\| \quad (2.1)$$

avec j_1 et j_2 sont les positions de deux extrémités de l'os b_j (deux articulations), r_i est la longueur du segment défini par le sommet v_i et sa projection q_i. Cette longueur est calculée avec la formule suivante :

$$r_i = \frac{\left\|(v_i - j_1)(j_2 - j_1)\right\|}{\left\|j_2 - j_1\right\|^2} \qquad (2.2)$$

Pour assurer un bon partitionnement, la dernière étape est contrôlée comme suit : pour tout sommet v_i du maillage, soit v_j son sommet adjacent qui a la plus petite distance à b_i. Si v_i et v_j sont affectés aux différents os, ou la distance d_i associée à v_i est plus grande que celle de v_j, alors v_i est affecté à un os inapproprié. Pour résoudre ce problème, nous utilisons l'algorithme de parcours en largeur pour réattribuer b_i comme os relatif à v_i. Par conséquent, nous obtenons des segments du maillage utiles, car les petites régions seront fusionnées dans leur plus grande région adjacente.

Le processus ci-dessus, permet de partitionner grossièrement le maillage du vêtement en plusieurs régions, comme le montre la figure 2.2, où différents maillages partiels sont visualisés en différentes couleurs.

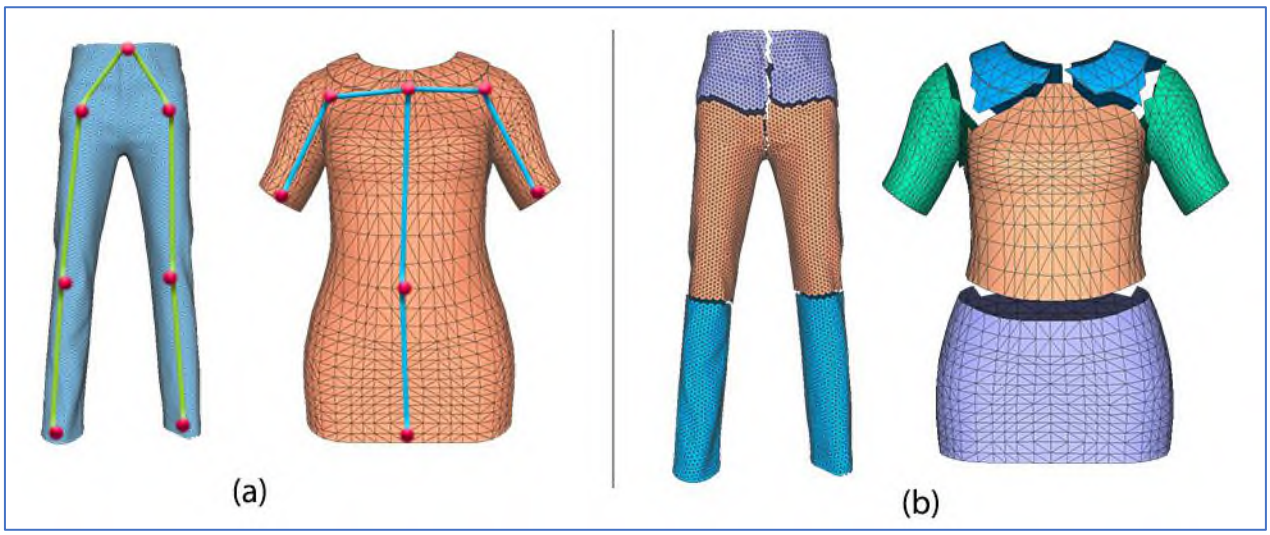


Figure 2-2 : Partitionnement de modèles de vêtements ; (a) Maillages avec squelette ; (b) les partitions des maillages résultants

2.3.2. Approximation du maillage de vêtement

Les HRBF sont un type de fonctions radiales qui interpolent naturellement des surfaces implicites lisses et fermées à partir d'un ensemble de points dispersés avec des directions de normales [99]. Ces fonctions sont très satisfaisantes pour l'interpolation de surface avec des variations subtiles, comme le corps du personnage. Nous avons adapté ces fonctions au contexte de simulation de plis de tissu en déformation, afin de réaliser une approximation implicite de tous les segments du maillage. Dans ce paragraphe nous allons détailler le processus que nous avons adopté (figure 2.3).

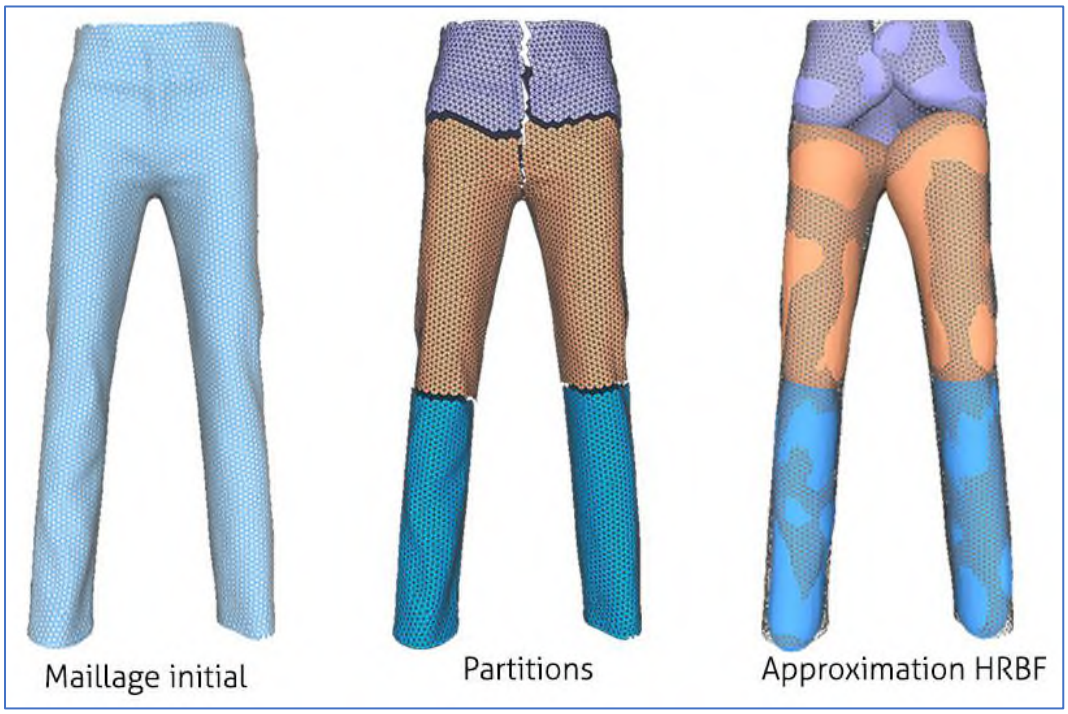


Figure 2-3 : Exemple d'approximation en HRBF du maillage de pantalon

Plus précisément, le processus d'approximation commence par l'échantillonnage de tout maillage partiel i avec un ensemble de N points de contrôle, en utilisant l'algorithme de "lancer de fléchettes" basé sur l'échantillonnage de *Poisson-disk* [145]. Un exemple d'utilisation de cet algorithme est illustré sur la figure 2.4.

Les points de contrôle sont utilisés pour calculer un champ potentiel d'approximation HRBF f_i défini par : $f_i : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$, tel que pour tout point de contrôle p_k et $\vec{n}_k$ la normale à la surface en

ce point, on a $f_i(p_k)=0.5$ et $\nabla f_i(p_k)=\vec{n}_k$. Le champ scalaire f_i permet de générer une surface implicite lisse définie par : $\{v\in\mathbb{R}^3 \mid f_i(v)=0.5\}$. Pratiquement, le champ f_i est implémenté comme une fonction à support compact en suivant deux étapes principales :

- **Première étape**

Nous commençons par une approximation du maillage partiel i en utilisant une iso-valeur égale à 0.5 pour reconstruire une fonction de distance globale g_i de la forme :

$$g_i(v)=\sum_{k=1}^{N}\left(a_k\phi(\|v-p_k\|)+\vec{c}_k\nabla\left(\phi(\|v-p_k\|)\right)\right) \quad (2.3)$$

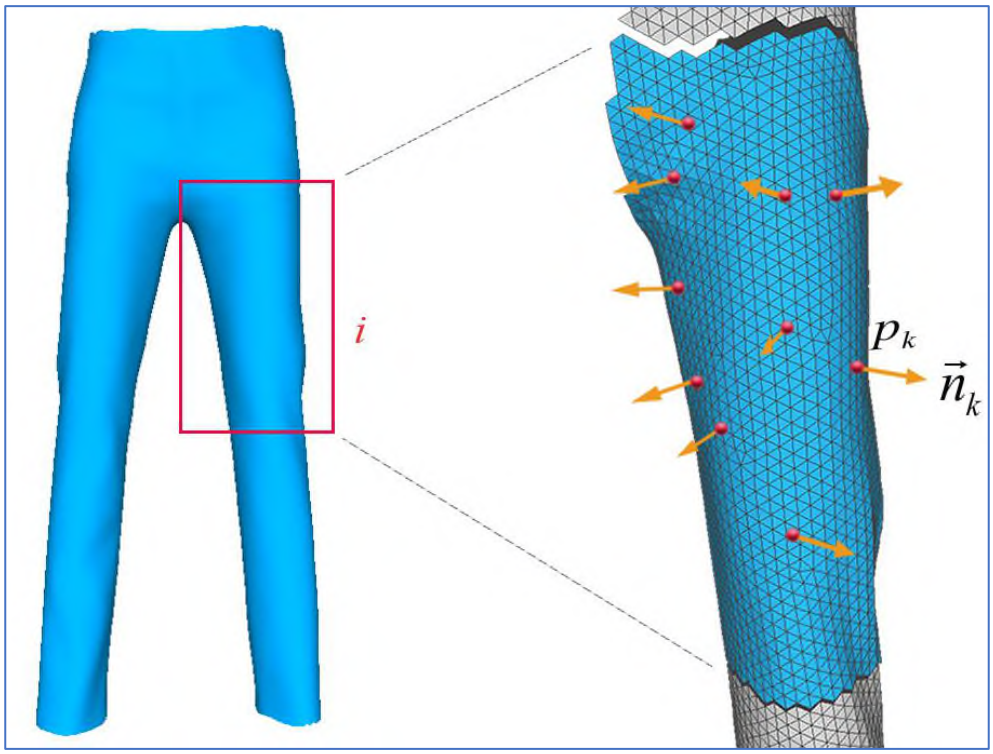


Figure 2-4 : Distribution de point de contrôle sur la surface d'un partie i du maillage

Avec la fonction ϕ est une spline poly-harmonique lisse telle que $\phi(x)=x^3$. La fonction g_i est exprimée comme étant une combinaison linéaire de fonctions à base radiale de ϕ dont la valeur ne dépend que de la distance à un point de contrôle, et le gradient en ce point. Les coefficients a_k et $\vec{c}_k$ sont généralement déterminés en résolvant le système linéaire suivant :

$$\begin{cases} g_i(p_k) = 0 \\ \nabla g_i(p_k) = \vec{n}_k \end{cases} \qquad (2.4)$$

En raison de la nature aléatoire de l'échantillonnage de Poisson, la forme de l'approximation HRBF générée devient très différente de la forme originale du maillage. Un tel problème surgisse généralement lors de l'échantillonnage des zones à haute résolution du maillage où les points échantillonnés peuvent se trouver sur des détails nets, ce qui engendre des distorsions de la forme. Heureusement, une fois que les points de contrôle HRBF soient échantillonnés, nous pouvons toujours les manipuler soit en modifiant leurs positions ou la direction des normales, soit en ajoutant ou supprimant des points de contrôle (points échantillonnés). Cela permet d'avoir une bonne approximation qui préserve la structure initiale du maillage.

Bien que les fonctions de distance signée soient un moyen intuitif pour représenter les distances, elles présentent certains inconvénients lorsqu'il s'agit d'une combinaison de plusieurs surfaces. Plus précisément, il est difficile de définir la localité à l'aide de ces fonctions. Un volume ne devrait influencer que son voisinage proche et ne devrait avoir aucun effet au-delà d'une certaine distance. Par conséquent, nous avons besoin d'une fonction avec un support local fini en convertissant le support infini des champs g_i.

- **Deuxième étape**

Le champ à support compact f_i est calculé en utilisant la transformation suivante :

$$f_i(v) = h_R(g_i(v)) \quad (2.5)$$

avec la fonction h_R est donné par la formule suivante :

$$h_R(x) = \begin{cases} 1 & si \quad x < -R \\ 0 & si \quad x > R \\ l(x/R) & si \quad x \in [-R, R] \end{cases} \qquad (2.6)$$

La fonction par morceaux h_R garantit la continuité C^2 en $h_R(x) = 0$ et $h_{-R}(x) = 1$. Avec la fonction d'interpolation $l(x) = -\frac{3}{16}x^5 + \frac{5}{8}x^3 - \frac{15}{16}x + \frac{1}{2}$. Et R le seuil de distance qui exprime la distance entre le point de contrôle p_k le plus extrême et l'os b_i associé au maillage partiel i,

nous avons choisi cette distance suite au fait que les parties de vêtements présentent généralement une symétrie de rotation approximative autour de leurs membres du corps humain associés et par la suite les os d'animation.

La fonction h_R permet de transformer les valeurs de champ de distance g_i défini dans l'intervalle $[-R,R]$ en valeurs dans l'intervalle $[0,1]$ tel que : $h_R(-R)=1$ et $h'_R(-R)=0$ définissent les valeurs de champ potentiel à l'intérieur du maillage. Et $h_R(0)=0.5$ représente les valeurs de champ potentiel sur la surface du maillage. Ainsi, $h_R(R)=h'_R(R)=0$ définisse les valeurs de champ potentiel à l'extérieur du maillage. La figure 2.5 représente la courbe d'évolution de la fonction de paramétrage h_R.

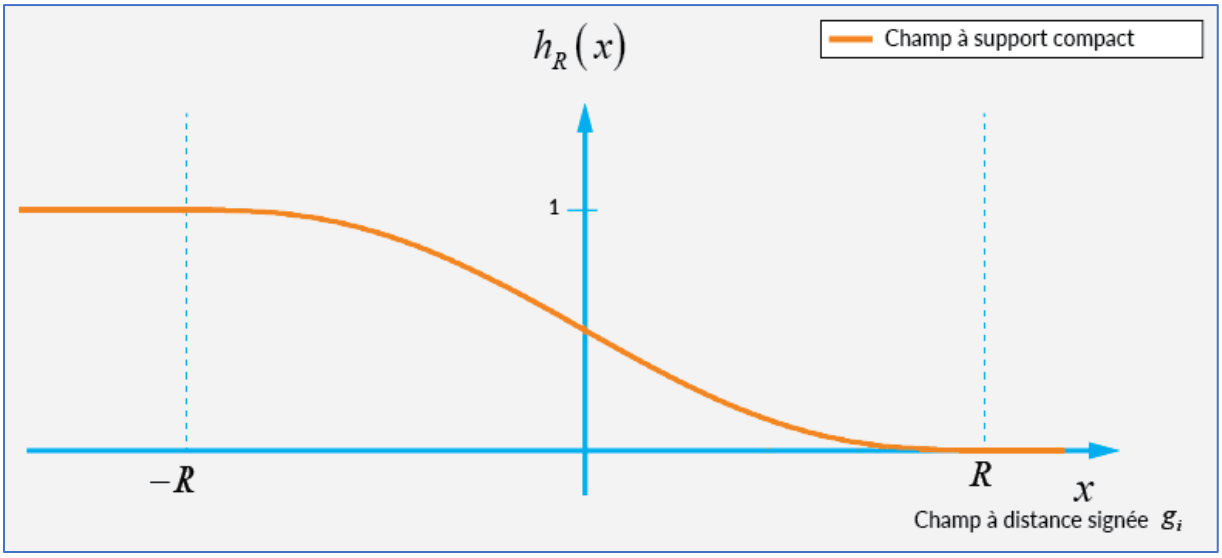


Figure 2-5 : Tracé de la fonction de re-paramétrisation

Pour accélérer l'évaluation de la fonction, chaque champ f_i est échantillonné dans la grille 3D. Les appels ultérieurs aux valeurs de f_i sont effectués par interpolation trilinéaire à l'intérieur de la grille d'échantillonnage. La figure 2.6 illustre deux exemples d'approximation HRBF des segments du vêtement et les surfaces implicites résultantes.

On note que dans certains cas, l'étape de partitionnement du maillage de tissu engendre des trous entre deux parties adjacentes au niveau d'articulation comme illustré sur la figure 2.7 (a) ci-après. Pour assurer une déformation crédible de tissu et par suite de créer des plis plausibles, la fonction

de champ f_i générée doit remplir correctement ces trous. Ceci est cruciale car deux surfaces voisines doivent être jointes sans introduire d'espaces ou de discontinuités de gradient.

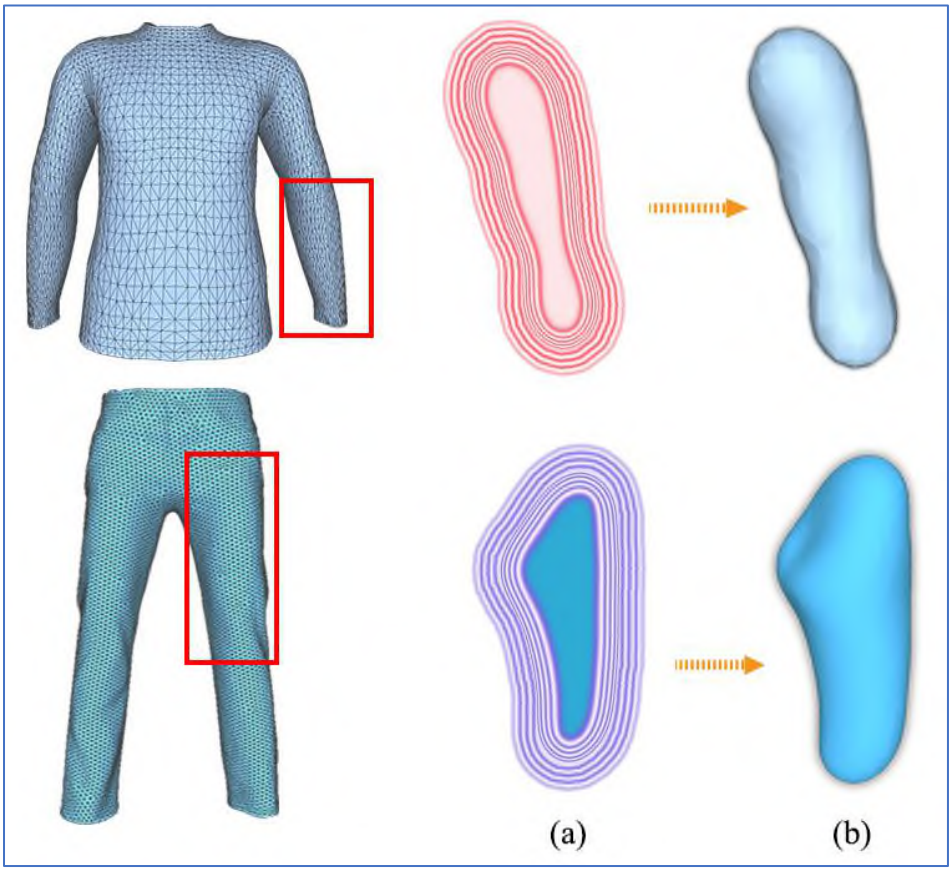


Figure 2-6 : Approximation des segments de vêtements ; (a) champs de potentiel HRBF ; (b) surfaces implicites résultantes

Pour résoudre le problème de trous, nous ajoutons deux points de contrôle c_1 et c_2 dans la limite du segment de maillage à une distance m_J de l'articulation J (figure 2.7 (b)). Cette distance est calculée entre le point d'articulation de l'os et le sommet d'extrémité du segment de maillage. L'introduction de ces nouveaux points permet de générer une reconstruction plausible des segments comme illustrés sur la figure 2.7 (b).

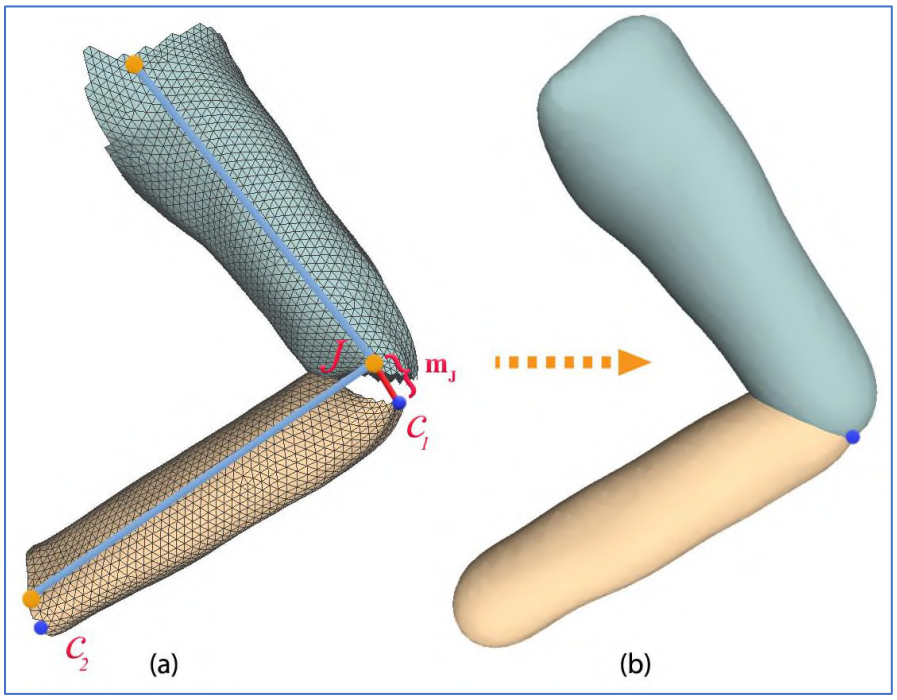


Figure 2-7 : Remplissage des trous laissés par l'étape de partitionnement ; (a) point de contrôle supplémentaire en bleu ; (b) la surface implicite finale reconstruite

2.3.2.1. Composition des champs potentiel

Après avoir calculé les fonctions de champ f_i pour chaque partie i du maillage. Nous composons tous ces champs partiels pour fournir un champ unique F qui définit l'approximation implicite de l'ensemble du vêtement. Au fil des années, l'amélioration de la composition des fonctions de champ, a été un axe de recherche important en modélisation et animation des surfaces implicites [109]. Parmi les opérateurs les plus utilisés pour la composition de deux surfaces implicites, on trouve l'opérateur d'union introduit par Ricci et al. [119]. La composition de deux champs adjacents f_1 et f_2 à l'aide de cet opérateur d'union est obtenu en utilisant la formule suivante :

$$k(f_1, f_2) = \max(f_1, f_2) \qquad (2.7)$$

Cependant, la version standard de l'opérateur d'union génère des fonctions de champ avec une continuité C^0, qui peuvent provoquer des effets indésirables au niveau des articulations, et ainsi conduire à des comportements indésirables de la surface lorsque les champs sont déplacés. De plus, en utilisant cet opérateur, la composition peut se produire même si les surfaces ne sont pas en contact. Afin d'éviter ces problèmes de composition, nous avons adopté l'opérateur de mélange

basé sur le gradient proposé par Gourmel et al. [54]. Cet opérateur est basé sur le concept d'utilisation des fonctions d'ouverture θ pour contrôler la composition. Ce concept a prouvé son efficacité dans la modélisation de contact entre deux surfaces implicites qui se croisent.

L'idée de base derrière les opérateurs basés sur le gradient est d'interpoler la composition entre l'union et le mélange en fonction d'un paramètre θ, qui est une fonction de conversion de l'angle entre les gradients de deux champs composés f_1 et f_2. Ainsi, θ est défini comme $\theta(\alpha)$.

Dans l'implémentation, nous avons défini l'angle α comme étant l'angle de rotation entre les os associés à f_1 et f_2. Comme nous pouvons le voir sur la figure 2.8, la valeur de cet angle est souvent proche de celle de l'angle entre les gradients de champ au niveau de l'articulation. L'exemple illustre une partie de genou d'un modèle de pantalon. Les flèches bleues et rouges sont respectivement les gradients des champs supérieurs et inférieurs.

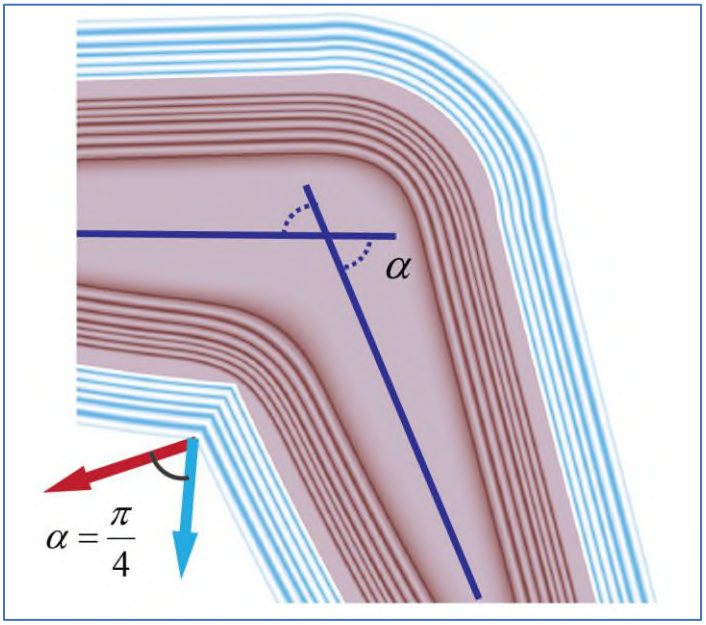


Figure 2-8 : Calcul de l'angle α à partir de l'angle entre les os associés aux champs.

L'application d'opérateur de mélange à base de gradient est effectuée suivant la configuration comme suit (figure 2.9) :

- Nous utilisons l'opérateur union lorsque f_1 et f_2 sont alignés, ce qui signifie que leurs os sont alignés $(\alpha = 0)$ et $\theta(0) = \theta_u$;

- Pour $\alpha \in \left]0, \frac{\pi}{4}\right]$, nous utilisons l'opérateur de mélange lisse avec $\theta(\alpha) = \theta_b(\alpha)$ (calculée en suivant l'équation 2.8) ;
- Pour $\alpha \in \left]\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right]$, la composition est effectuée à l'aide du mélange lisse avec $\theta(\alpha) = \theta_b(\alpha)$ (l'équation 2.8) ;
- Pour $\alpha \in \left]\frac{\pi}{2}, \pi\right]$ utilisons l'opérateur union avec $\theta(\alpha) = \theta_u$.

Dans l'implémentation, nous avons calculé le paramètre $\theta(\alpha)$ en utilisant le *"mapping"* suivant :

$$\theta(\alpha)\begin{cases} \theta_u = \frac{\pi}{4} & si \quad \alpha = 0 \\ \theta_b(\alpha) = \frac{3\pi}{20}\left(e\left(1 - \frac{4\alpha}{\pi}\right)\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\pi}{10} & si \quad \alpha \in \left]0, \frac{\pi}{4}\right] \\ \theta_b(\alpha) = \frac{3\pi}{20}\left(e\left(\frac{4\alpha}{\pi} - 1\right)\right) + \frac{\pi}{10} & si \quad \alpha \in \left]\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right] \\ \theta_u = \frac{\pi}{4} & si \quad \alpha \in \left]\frac{\pi}{2}, \pi\right] \end{cases} \qquad (2.8)$$

avec $e(x) = 1 - \exp\left(1 - \frac{1}{\exp\left(1 - \frac{1}{x}\right)}\right)$.

Nous avons implémenté l'opérateur de mélange k_b comme étant une fonction par morceaux. Nous modifions la partie intérieure de sorte que le mélange diminue entre les valeurs de champ potentiel 0.5 et 0.6. Ce paramétrage est le plus approprié pour produire un champ interne bien adapté au déplacement des sommets lors de la projection (paragraphe 2.3.3). L'équation de l'opérateur de mélange est donnée comme suit :

$$k_b(f_1, f_2) = \begin{cases} \max(f_1, f_2) & si \quad f_1 > 0.5 \ ou \ f_2 > 0.6 \\ \max(f_1, f_2) & si \quad f_1 < I_\theta(f_2) \ ou \ f_2 < I_\theta(f_1) \\ X & sinon \end{cases} \qquad (2.9)$$

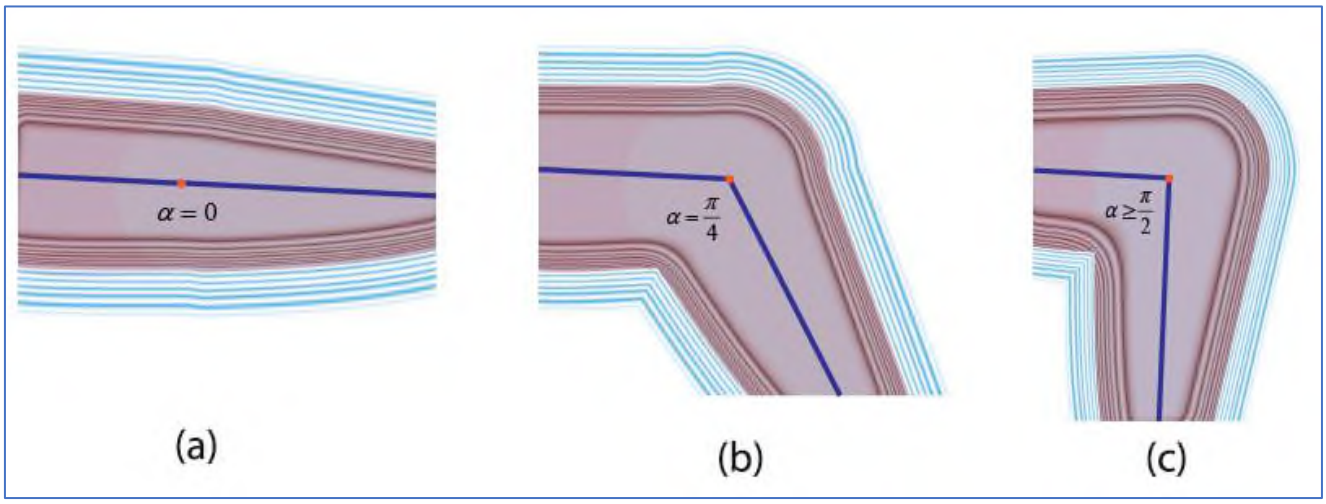


Figure 2-9 : Coupe transversale du champ généré par la composition des deux champs constituants la partie de genou ; (a) et (c) le résultat de composition avec l'opérateur d'union ; (b) le résultat de composition avec l'opérateur de mélange lisse

avec X est déterminé par la résolution de l'équation suivante :

$$\frac{\sqrt{\left(f_1 - I_\theta(X)\right)^2 + \left(f_2 - I_\theta(X)\right)^2}}{\left(X - I_\theta(X)\right)} - 1 = 0 \quad (2.10)$$

Et la fonction h_θ est exprimée comme suit :

$$I_\theta(x) = \begin{cases} \tan(\theta)\, x & si \quad f_1 \leq 0.5 \quad et \quad f_2 \leq 0.6 \\ \frac{1}{2}\left(7 - 5\tan(\theta)\right)x + \frac{7}{4}\left(\tan(\theta) - 1\right) & sinon \end{cases} \quad (2.11)$$

Le processus de composition est effectué de manière récursive en utilisant une composition par arbre, qui ressemble beaucoup à un arbre CSG classique [147]. L'arbre de composition (où les fonctions de champ sont des feuilles et les opérateurs de composition sont des nœuds) est alors construit comme suit :

Suivant la structure du squelette d'animation, les champs associés aux os d'extrémité sont d'abord composés avec les champs de leurs os parents, à l'aide de l'opérateur de composition k_b. Cette première composition forme la base de l'arbre. Ensuite, les champs résultants sont composés avec leurs parents, jusqu'à ce que toutes les primitives soient combinées dans un seul arbre. À la fin, l'opérateur de composition finale définit le champ scalaire F qui représente l'ensemble du maillage du vêtement.

2.3.3. Déformation de vêtements

Après la reconstruction de surface implicite pour le maillage du vêtement à l'aide d'approximation HRBF, celle-ci peut être facilement déformé en appliquant les transformations spatiales du squelette aux champs scalaires f_i. Ainsi durant la déformation du vêtement, les champs scalaires sont déplacés par la transformation T_i de leurs os associés, telle que :

$$\begin{cases} f_i(v) = f_i\left(T_i^{-1}v\right) \\ \nabla f_i(v) = J\left(T_i\right)\nabla f_i\left(T_i^{-1}v\right) \end{cases} \quad (2.12)$$

Où J est la matrice Jacobienne de T_i. L'algorithme 2.1 détaille le pseudo-code de l'étape de suivi du maillage. Chaque fois que nous appliquons une transformation aux champs f_i, nous effectuons à nouveau une étape de composition comme dans le paragraphe 2.3.2.1. Cela permet d'obtenir un nouveau champ global F_t qui représente la composition récursive des champs transformés (Figure 2.10 (b)). Par conséquent, le champ F_t suit le mouvement du squelette (Figure 2.10 (a)), et grâce à l'utilisation de l'opérateur à base de gradient, la composition produit de meilleurs résultats de gestion de contact de surface au niveau des articulations (Figure 2.10 (c)).

Comme illustré sur la figure 2.10, la surface du champ potentiel capture approximativement la forme à basse fréquence du maillage du vêtement. Notre idée de déformation consiste à utiliser ce champ potentiel comme contrôleur de la déformation du maillage. Ce qui va permettre une correction des distorsions produite par la déformation du vêtement à l'aide de *skinning* par quaternions duaux (DQS) (Annexe C).

Pratiquement, le processus de déformation du vêtement se déroule de la façon suivante :

- Avant de commencer la déformation du vêtement, tout sommet v du maillage stocke sa valeur initiale e_v de champ potentiel (non déformé) tel que $e_v = F_{t_0}(v)$;
- Pendant la déformation, les sommets du maillage sont déplacés en utilisant une transformation par méthode de *dual-quaternions skinning*, ce qui nous donne une première estimation du maillage déformé ;

- Dans chaque sommet v, la comparaison de la valeur du nouveau champ potentiel transformé $F_t(v)$, avec la valeur initiale e_v permet de déterminer si la position de v doit être ajustée. En suivant ce processus, les sommets gardent une même iso-valeur de champ potentiel, et par la suite on évite les distorsions produites par la déformation DQS initial. La figure 2.11 montre le processus de suivi des sommets du maillage.

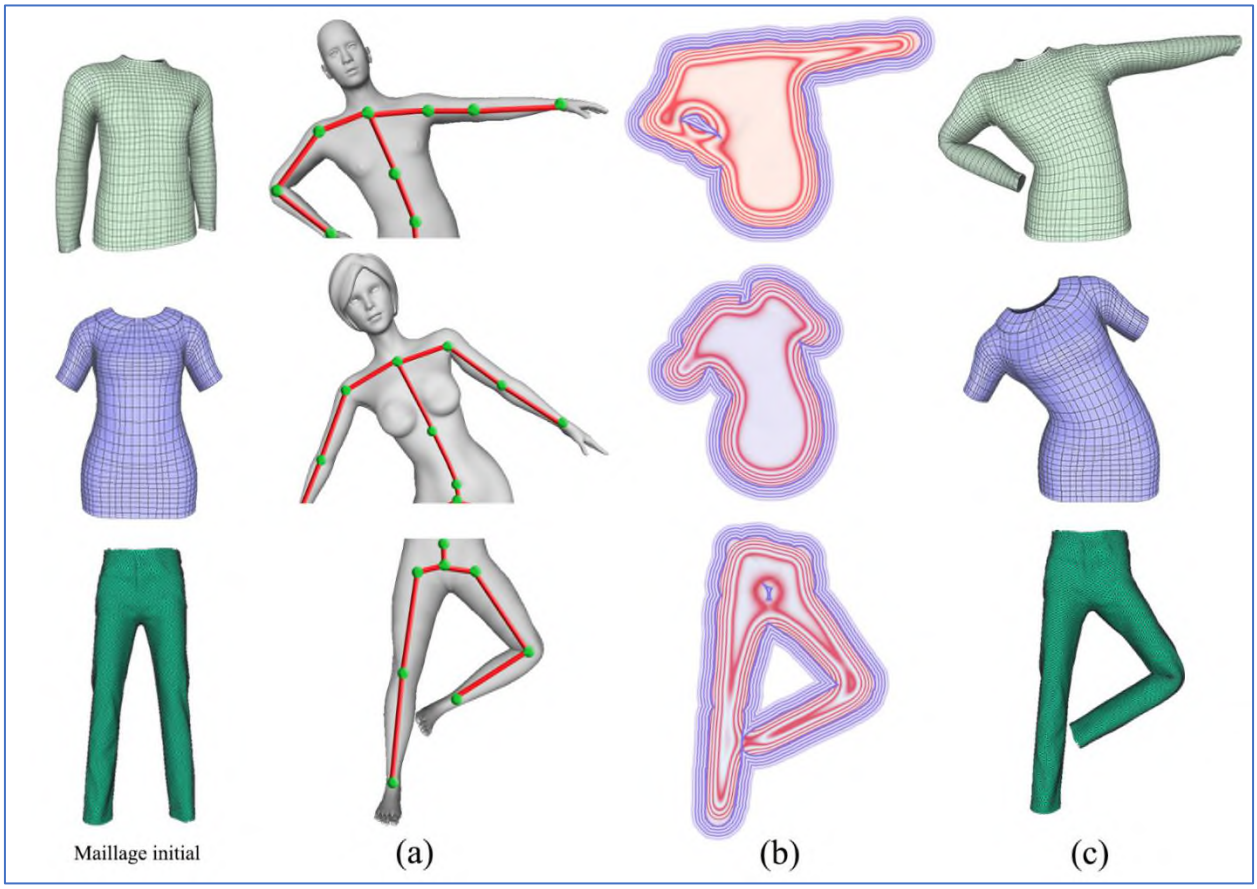


Figure 2-10 : Exemple de déformation de trois modèles de vêtement ; (a) positionnement de squelette d'animation ; (b) Le champ potentiel global obtenu après la transformation ; (c) la déformation de vêtement

Nous avons résumé les étapes du processus de suivi des sommets dans l'algorithme 2.1. Pratiquement, le processus est effectué de manière itérative jusqu'à ce que l'iso-valeur ciblée soit atteinte. À chaque itération, nous évaluons la valeur de F_t ainsi que son gradient en tout sommet v. Ensuite nous calculons le vecteur de déplacement $\vec{h}$ dont la direction est donnée par le gradient de F_t, et la longueur d donnée par la distance entre la valeur $F_t(v)$ et la valeur initiale e_v. Le paramètre $\tau = 0.35$ contrôle la vitesse à laquelle les sommets convergent vers leur

position initiale par rapport au champ scalaire. Le processus de suivi est effectué en utilisant les itérations de Newton afin de fournir une convergence rapide et précise.

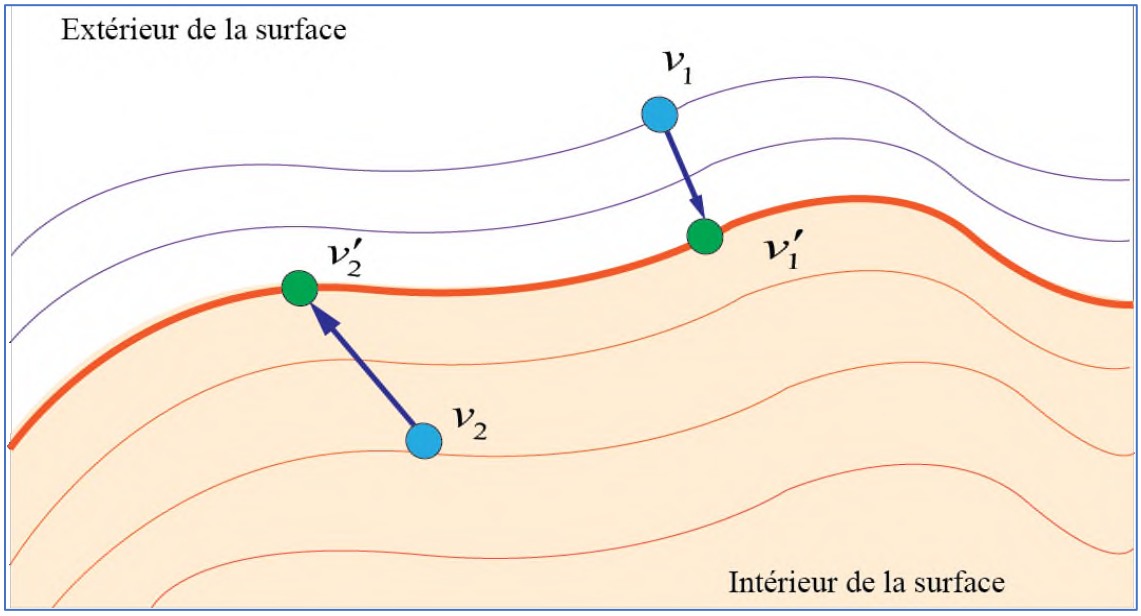


Figure 2-11 : Exemple de correction des positions de sommet effectuée à l'aide du processus de suivi

Algorithme 2.1 : Processus de suivi du sommet.

Entrée : Le maillage du vêtement M , champ potentiel F_t , critère de convergence τ

Sortie : v' : la position mise à jour de v

1. **Pour tout** $v \in M$ **faire**
2. Mettre à jour la fonction de champ $f_i \leftarrow F_t(v)$
3. Calculer la direction $\vec{h} \leftarrow \nabla F_t(v)$
4. Calculer la longueur $d \leftarrow f_i - e_v$
5. **Si** $|d| < \varepsilon$ **alors**
6. **Retourner** v
7. **Fin si**
8. Calculer le vecteur de déplacement $\vec{k} \leftarrow -\tau d \left(\frac{\vec{h}}{\|\vec{h}\|^2} \right)$
9. Mettre à jour la position du sommet $v' \leftarrow v + \vec{k}$
10. **Retourner** v'
11. **Fin pour**

Étant donné que les positions des sommets générées par DQS peuvent être éloignées de leurs positions exactes, une simple utilisation du processus de suivi pourrait engendrer des lacunes exceptionnelles dans le maillage déformé après quelques transformations. Afin d'améliorer le déplacement des sommets et d'éviter ses lacunes, nous effectuons une étape de relaxation tangentielle en utilisant la méthode des coordonnées de valeur moyenne proposée par Hormann et al. [65], qui vise à déplacer chaque sommet vers le centre de gravité pondéré de ses voisins comme indiqué sur la figure 2.12. Plus précisément, les coordonnées barycentriques Φ_j sont précalculées dans la pose initiale de chaque sommet v_i par rapport à son anneau de sommet voisin. La relaxation tangentielle déplace les sommets en utilisant la formule suivante :

$$v' = (1-\mu)v + \mu\sum_j \Phi_j c_j \qquad (2.13)$$

avec c_j représente un sommet voisin de v qui est projeté sur son plan tangentiel. Le coefficient μ est utilisé pour contrôler le degré de l'opération de relaxation, et il est défini par : $\mu = \max\left(0,1-\left(\left|F_t(v)-e_v\right|-1\right)^4\right)$.

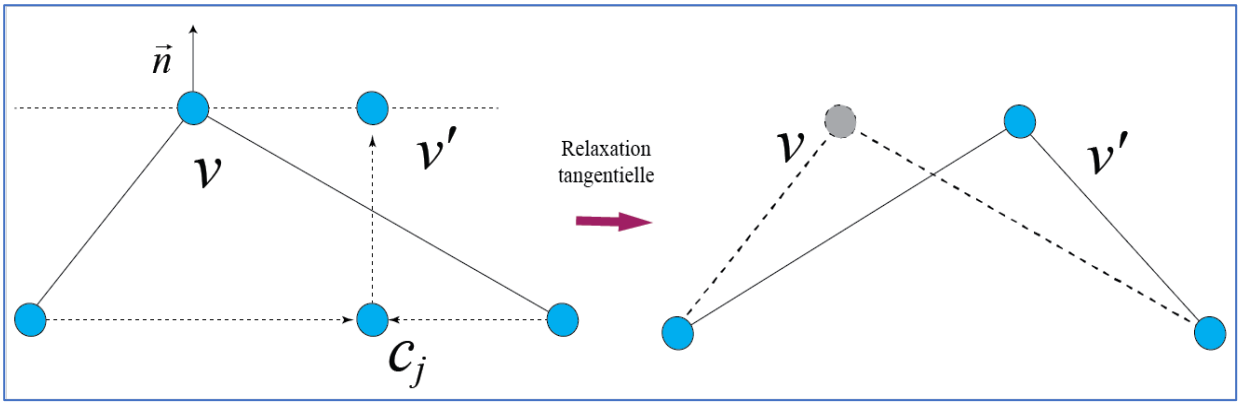


Figure 2-12 : Exemple de relaxation tangentielle

2.4. Génération de plis

Dans ce paragraphe, nous détaillons la méthode utilisée pour générer des plis plausibles sur un maillage déformé à l'aide d'enrobage implicite basé sur l'approximation HRBF. Ce processus suit l'étape précédente de reconstruction du maillage qui consiste à déformer le vêtement. L'idée clé de cette méthode de synthèse de plis est de tirer parti des champs scalaires f_i disponibles. Nous utilisons leur intersection au niveau des articulations pour tracer des courbes de plis. Cette

intersection permet de préciser les points de génération (semences) des courbes. Les directions des courbes sont déterminées par le calcul d'angles entre les gradients de deux champs consécutifs. Afin de créer la forme géométrique des plis, nous transformons ces courbes de plis en surfaces de convolution. Finalement, nous combinons les surfaces de convolution générées avec le maillage de tissu.

2.4.1. Préparation des champs d'angles

En général, les plis de vêtements apparaissent dans les régions d'articulation en suivant la direction de la contraction. Afin de déterminer la direction des courbes de plis, nous commençons par le calcul des angles entre les gradients des deux champs adjacents f_1 et f_2 dans les points d'intersection (figure 2.13). L'angle entre les gradients est alors calculé pour tout sommet $v \in f_1 \cap f_2$ comme suit :

$$A\left(f_1(v), f_2(v)\right) = \arccos \frac{\nabla F_1(v).\nabla F_2(v)}{\left\|\nabla F_1(v)\right\|.\left\|\nabla F_2(v)\right\|} \quad (2.14)$$

Suivant les valeurs de A, nous générons un champ d'intersection f_A. Ensuite le gradient de f_A est approché à l'aide de la méthode des différences finies, en recherchant la position avec une valeur minimale v_m dans l'anneau du voisinage de v tel que :

$$\nabla f_A = v_m - v \quad (2.15)$$

Nous notons que le calcul de l'angle est indépendant pour chaque sommet. Comme avantage, cette étape peut être parallélisée dans une carte graphique programmable. À chaque itération, nous insérons tout sommet v traité dans une file d'attente prioritaire Q ordonnée suivant la valeur de A dans ce sommet. Nous avons détaillé le pseudo-code de cette étape dans l'algorithme 2.2 (étape 1).

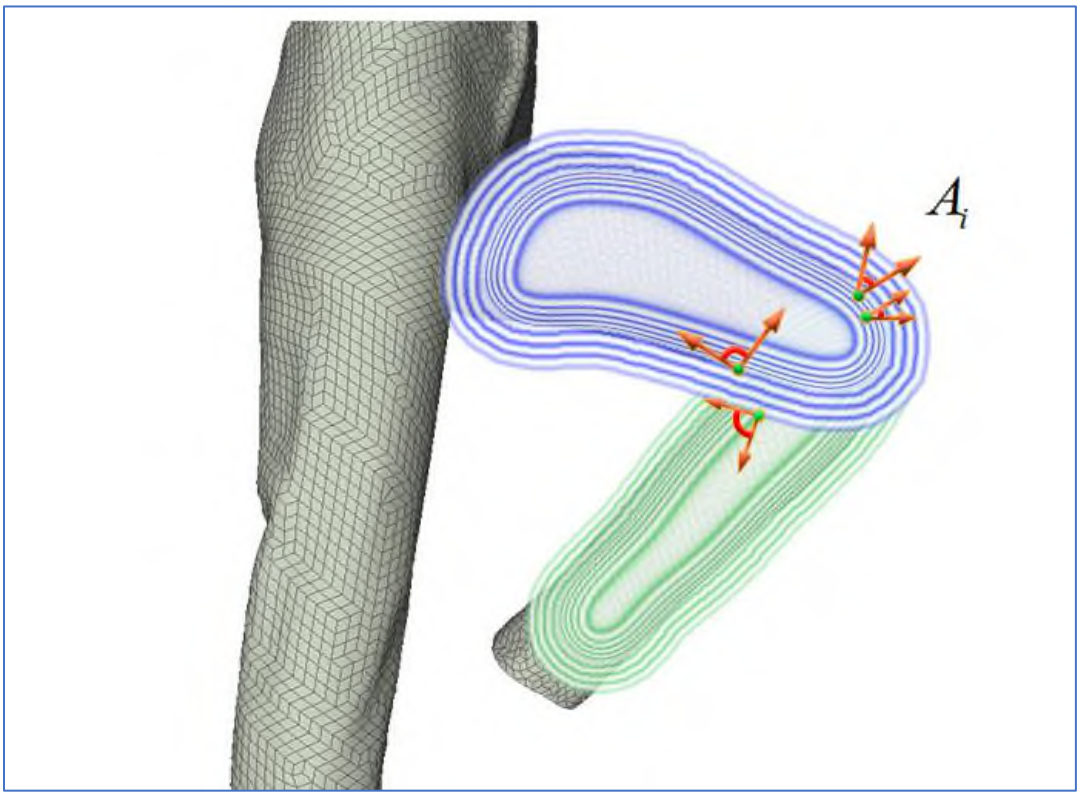


Figure 2-13 : Exemple des angles de gradient dans l'intersection de deux champs HRBF

2.4.2. Génération des courbes de plis

Nous visons à générer efficacement des courbes de plis qui donnent un aspect plausible au tissu, et qui reflètent la déformation du maillage. Pour cela, nous utilisons la file d'attente prioritaire Q que nous avons créée à l'étape précédente. Cette file contient des sommets situés dans la région d'intersection des champs potentiels comme illustrés sur la figure 2.14 (a). En commençant par le sommet du haut de la file Q, comme point de départ de la génération d'une courbe (point vert sur la figure 2.14 (b)), le processus de traçage de la courbe se déroule comme suit :

Soit p le point de départ, les sommets sont ajoutés à la courbe de manière itérative en choisissant le candidat suivant parmi les N sommets dans l'anneau d'ordre 1 du voisinage de p. Nous choisissons le sommet candidat qui a le vecteur d'arête le plus proche du gradient ∇f_A en p : soient q le sommet voisin candidat et $y = q - p$ le vecteur d'arête, le prochain sommet à ajouter à la courbe est déterminé par la minimisation suivante :

$$p_{next} = \min_{q \in N} \left(\arccos \left(y . \nabla f_A \right) \right) \quad (2.16)$$

Le processus est répété pour le point nouvellement ajouté. De plus, pour chaque point de départ, nous inversons le gradient pour propager la seconde moitié de la courbe. Pour chaque nouveau point ajouté à une courbe, nous vérifions sa distance Euclidienne par rapport à tous les points, afin de forcer la courbe à respecter une distance minimum avec les autres courbes. Cela permet de contrôler la collision entre les plis.

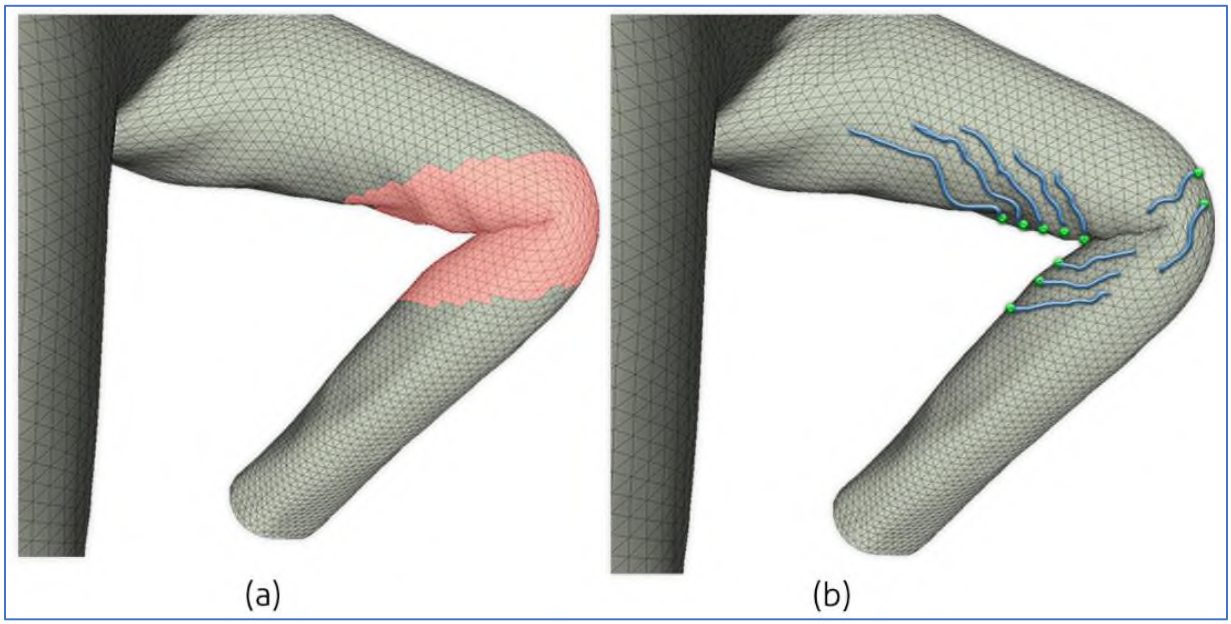


Figure 2-14 : (a) en rouge l'intersection des deux champs ; (b) en bleu les courbes de plis ; en vert les points de départ de traçage des courbes

Dans l'algorithme 2.2 (étape 2) nous détaillons le pseudo-code du processus de génération de courbes de plis. Comme données d'entrée, le système reçoit le maillage de vêtement, le nombre d'os, les champs potentiels HRBF approximés comme décrit dans le paragraphe 2.3.2. En résultat, le système produit les courbes de plis sous forme de structure de données où chaque nœud représente une courbe pour chaque point de départ (figure 2.14 (b)).

Nous pouvons noter que le système proposé est procédural et permet à l'utilisateur de contrôler la génération des courbes de plis en manipulant des paramètres de base (Algorithme 2.2), dont certains sont décrits ci-dessous :

- **Seuil de semences** (point de départ de traçage) : $\gamma \in [0,180]$ est la valeur d'angle minimum qu'un sommet de la file d'attente prioritaire doit avoir pour être sélectionné

comme point de départ de la courbe. Ce paramètre permet aux plis de commencer à se former également sur les bords de la surface.

- **Seuil de point candidat :** $\tau \in [0,1]$ est une valeur minimale du champ de gradient qu'un nouveau sommet candidat doit avoir pour être ajouté à la courbe. Ce paramètre permet de contrôler la direction de propagation de la courbe.

Algorithme 2.2 : Génération des courbes de plis.

Entrée : Maillage de vêtement, nombre d'os B, champs potentiels HRBF associés à chaque os

Sortie : Les courbe de plis.

1. Pour $i \in [1, B]$ **faire**

2. // Étape 1 : préparation des angles de champ d'intersection.

3. Créer la file d'attente prioritaire $Q_i \leftarrow [\ ]$

4. Pour tout $v \in f_i \cap f_{i+1}$ **faire**

5. Calculer l'angle $A_v = A\left(f_i(v), f_{i+1}(v)\right)$

6. Déterminer v_m dans le voisinage de v

7. Calculer $\nabla f_A = v_m - v$

8. Ajouter le triple $\langle v, A_v, \nabla f_A \rangle$ au file Q_i

9. Fin pour

10. Trier Q_i en se basant sur les valeurs de A_v

11. Créer $WrinkleCurve \leftarrow [\ ]$

12. // **Étape 2 : génération des courbes de plis.**

13. Pour tout p dans Q_i **faire**

14. Créer $newCurve \leftarrow [\ ]$

15. Si $A_p \leq \gamma$ **alors** *// paramètre défini par l'utilisateur*

16. Ajouter p à $newCurve$

17. Pour tout p_{seed} dans $newCurve$ **faire**

18. Déterminer les sommets q dans le voisinage N de p_{seed}

19. Résoudre $p_{next} \leftarrow \min_{q \in N}\left((q - p_{seed}).\nabla f_A(p_{seed})\right)$

20. **Si** $\nabla f_A(p_{next}) \leq \tau$ **alors** ***// paramètre défini par l'utilisateur***

21. Ajouter p_{next} à *newCurve*

22. **Fin si**

23. **Fin pour**

24. **Fin si**

25. Ajouter *newCurve* à *WrinkleCurve*

26. **Fin pour**

27. **Retourner** *WrinkleCurve*

28. Fin pour

2.4.3. Principe du mouvement des plis

Pour donner aux courbes de plis un aspect du mouvement potentiel, nous initialisons la position des courbes à l'instant courante à partir de la position précédente. On rappelle que la génération statique place les courbes de plis en suivant les valeurs de l'angle entre les gradients des champs HRBF, et trace ces lignes le long des courbes intégrales du champ d'intersection.

Afin de prendre en considération le cas de courbes dynamiques, nous avons ajouté une étape qui permet d'attirer les courbes de plis vers les nouveaux de forte déformation. Dans l'objectif d'assurer l'efficacité de création des plis, nous ne cherchons pas les emplacements locaux de forte déformation le long de la totalité des courbes, mais uniquement pour les positions des générateurs. Dans la suite de ce paragraphe, nous décrivons la méthode utilisée pour attirer les points générateurs des courbes de plis vers les emplacements de forte déformation.

Dans l'étape de génération des courbes de plis, nous ordonnons la file d'attente prioritaire Q suivant les valeurs de A_v, ce qui permet d'ordonner les positions des points générateurs en fonction de leur taux de déformation des champs associés.

Pour chaque point générateur $p(t_i)$ à l'instant t_i, sa nouvelle position à l'instant $t_i + dt$ est définie par $p(t_i) + dp(t_i)$ avec dp est un faible déplacement de champ potentiel modélisant le glissement de plis. La figure 2.15 illustre un exemple de déplacement du point générateur.

Afin de préciser le taux de déplacement optimal des points générateurs, nous adoptons une recherche linéaire le long de la direction du gradient de champs d'intersection, tout en respectant le pas maximal autorisé entre les courbes à $R_{\max}$. Ce processus empêche donc les courbes de se déplacer de plus de la moitié de leur largeur lors d'un pas de temps, et permet un résultat visuel crédible.

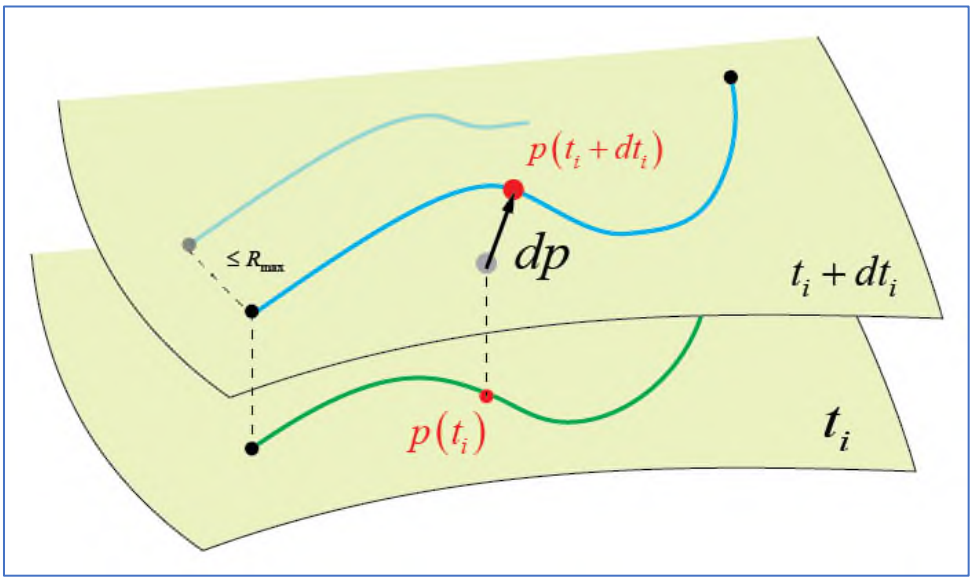


Figure 2-15 : Principe du mouvement de courbe de plis ; La courbes vert et bleu sont respectivement les courbe de plis à l'instant précédente et courante ; Le point rouge représente un exemple de mouvement de point générateur

2.4.4. Génération de la forme géométrique de plis

Une fois que les courbes de plis sont créées comme décrit dans la partie précédente, elles sont représentées comme un ensemble de segments constitué de sommets de la région d'intersection des champs. Nous créons la forme géométrique des plis en transformant ces segments en surface de convolution w_i , ainsi de seuiller la somme de leurs contributions au champ comme suit :

$$F_{wrinkle}(v) = \sum_i w_i(v) - iso \qquad (2.17)$$

Nous utilisons des surfaces de convolution avec des segments de ligne comme squelettes, et le noyau de Cauchy comme fonction potentielle. Nous suivons la formulation de surface proposée par McCormack et al. [104]. Ainsi pour un segment avec le vecteur de position a_i, la direction normalisée r_i et la longueur l, le calcul de $w_i(v)$ est réalisé en utilisant l'expression suivante :

$$w_i(v) = \frac{n}{2p_v^2\left(p_v^2 + s^2 n_v^2\right)} + \frac{l - n_v}{2p_v^2 q_v^2} + \frac{1}{2sp_v^3}\left(\operatorname{atan}\left[\frac{sn_v}{p_v}\right] + \operatorname{atan}\left[\frac{s(l - n_v)}{p_v}\right]\right) \qquad (2.18)$$

Avec $n_v = (v - a_i)r_i$, $p_v^2 = 1 + s^2\left(|v - a_i|^2 - n_v^2\right)$ et $q_v^2 = 1 + s^2\left(|v - a_i|^2 + l^2 - 2ln_v\right)$.

Dans l'implémentation, nous avons utilisé les paramètres par défaut suivants :

- L'iso-valeur dans l'équation 2.17 est défini par : $iso = 0.5$.
- La hauteur des plis est définie par : $s = 0.86$ (équation 2.18).

Le principal avantage d'utiliser les surfaces de convolution est que les segments de plis générés se fondent en douceur, et peuvent être facilement intégrés à la surface du vêtement déformé. Nous avons défini le rayon de chaque segment comme un paramètre de l'amplitude de l'angle à chaque point de la courbe. Par conséquent, les plis résultants apparaissent plus épais au milieu de la courbe et légèrement plus étroits sur les bords.

2.4.5. Projection des plis sur le maillage du vêtement

Dans cette étape, nous visons à mélanger les plis avec la surface du maillage du vêtement déformé. En effet, après avoir précisé les positions des courbes de plis, et généré le champ de plis $F_{wrinkle}$ comme surface de convolution, nous mélangeons chaque champ HRBF avec son champ de plis. Ainsi, le nouveau champ F_{comb} à un point arbitraire v, est exprimé comme suit :

$$F_{comb}(v) = \max\left(F_t(v) - 0.5, F_{wrinkle}(v)\right) \qquad (2.19)$$

Pour cette composition, nous utilisons l'opérateur union, bien qu'un opérateur de fusion plus complexe puisse également être utilisé. Nous projetons des sommets sur ce champ combiné en utilisant des itérations de Newton [116].

Pendant la projection, nous n'avons pas besoin de gérer la collision en utilisant le gradient. Au lieu de ceci, les interpénétrations du maillage sont évitées par la réutilisation du coefficient défini dans l'étape de génération des courbes, pour interdire le déplacement des sommets dans la région de plissement.

Afin d'obtenir un aspect lisse des plis, nous avons modélisé la profondeur des plis en utilisant le décalage entre les angles d'articulation dans la pose courante et la pose d'initial. Pour obtenir l'apparence progressive des plis, nous plaçons d'abord les sommets de la courbe sous la surface du tissu à une distance, qui correspond au rayon du segment de courbe, ensuite nous les déplaçons doucement vers le haut dans la direction de la normale. La figure 2.16 montre un exemple de plis généré à l'aide de la méthode de synthèse de plis.

Nous pouvons noter qu'il est possible d'effectuer un simple déplacement des sommets de la courbe au lieu d'utiliser l'étape de projection des sommets. Cependant, cela produit des plis nets et uniformes, ainsi que le rayon des plis ne sera pas contrôlable.

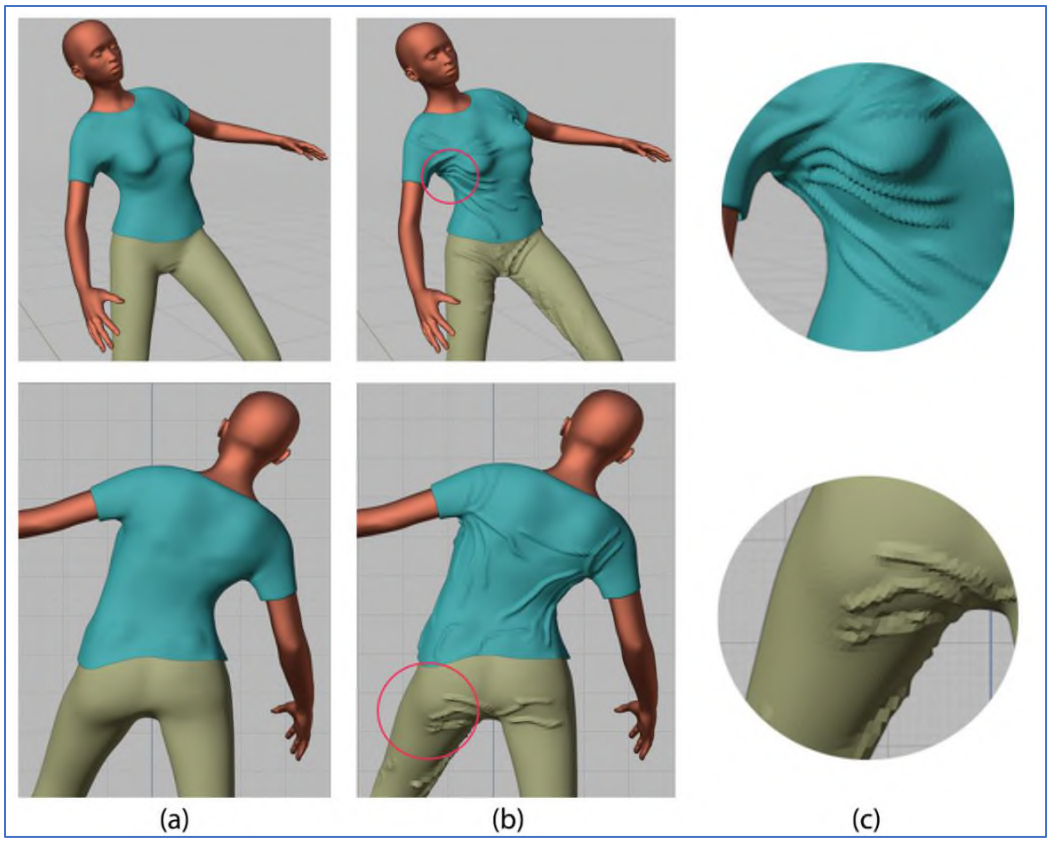


Figure 2-16 : Plis générés ; (a) maillage du vêtement déformé ; (b) maillage après l'étape de projection ; (c) zoom sur les plis ajoutés

Comme nous pouvons remarquer sur la figure 2.16 (c), l'étape de projection de plis peut engendrer des plis qui ne sont pas suffisamment lisses avec des caractéristiques pointues. Pour améliorer la qualité des plis nous effectuons une étape de lissage par Laplacien sur les sommets du maillage en utilisant la formule suivante :

$$v' = (1-\lambda)v + \lambda c_{cent} \quad (2.20)$$

Pratiquement, chaque sommet v_i est déplacé vers le centroïde de son anneau des sommets voisins. Le coefficient de lissage λ est mis à 1 pour les sommets arrêtés à une discontinuité de gradient, et à 0 pour les autres sommets. Pour avoir une transition propre, les valeurs λ sont interpolées par diffusion avant d'appliquer le lissage. Le résultat final d'application du lissage est illustré sur la figure 2.17.

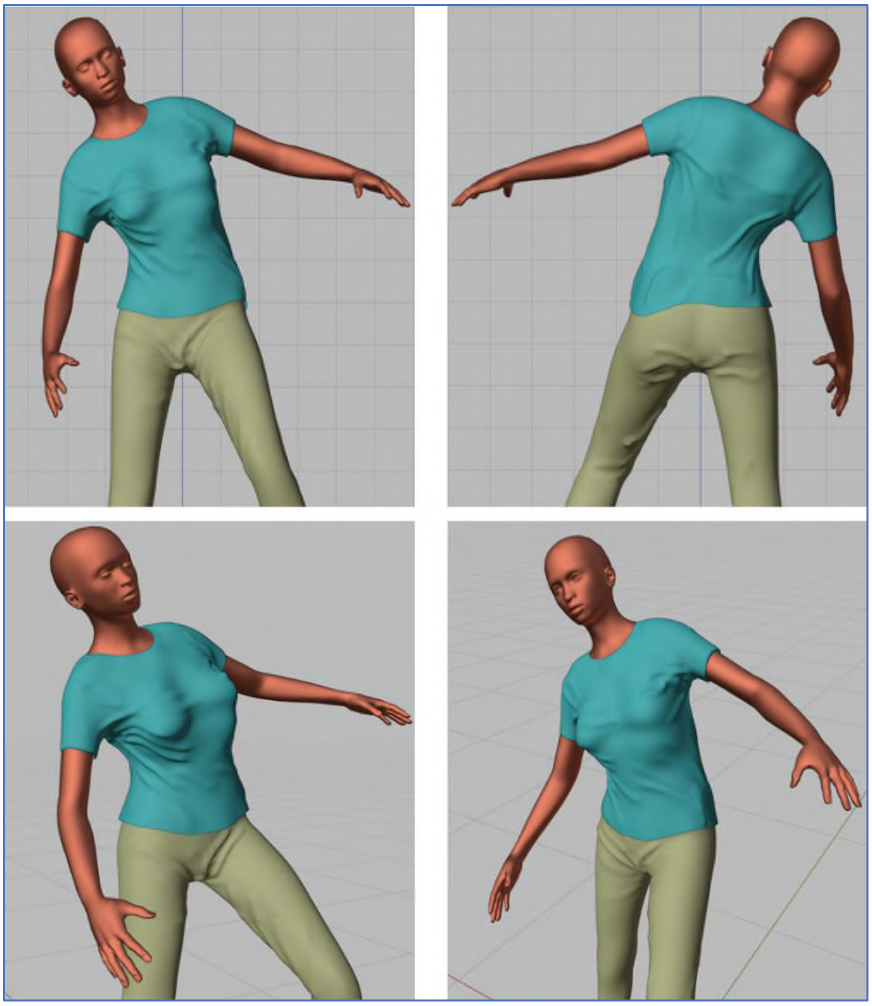


Figure 2-17 : Maillage final obtenu à la fin d'application du lissage

2.5. Résultats expérimentaux

Dans le présent paragraphe, nous évaluons les résultats obtenus par comparaison à d'autres méthodes proposées dans ce contexte, et nous montrons l'efficacité de notre approche d'ajout de plis en matière de plausibilité visuelle et performances d'exécution.

2.5.1. Performances de calcul

Nous avons implémenté la méthode d'ajout de plis sur un PC avec processeur Intel i7-4720HQ de capacité 2.60 GHz, un GPU GeForce 480 GTX, et une RAM de 16GB.

Dans l'implémentation, nous avons utilisé le mécanisme du parallélisme sur le GPU de manière intensive. Plus précisément, la génération des surfaces *"Dual quaternions"* [75], le suivi des sommets et la relaxation tangentielle sont des étapes effectuées par sommet en utilisant la technique du parallélisme sur GPU. Pour permettre une évaluation d'interpolation rapide, nous avons échantillonné les fonctions potentielles à une résolution de 229 en texture 3D et l'opérateur de composition (Paragraphe 2.3.2.1) à une résolution de 1189.

Comme squelette d'animation pour animer les personnages habillés de nos exemples, nous avons adopté les squelettes prédéfinis, qui sont proposés dans la base de données de *Motion Capture Database (MCD)* de l'Université Carnegie Mellon [126]. Tous les modèles de vêtements que nous avons utilisés sont animés avec un squelette de 6 à 21 os. Ils nécessitent de 1 Mo à 5 Mo pour le stockage du maillage déformé.

Nous pouvons noter que l'étape du calcul de l'angle entre les champs HRBF, ainsi que l'étape de projection de sommets des courbes (Paragraphe 2.3.3) sont des tâches indépendantes, c'est-à-dire qu'elles pourraient facilement être implémentées sur le GPU ou sur des processeurs "*Multithread*".

Nous avons résumé les performances d'exécution des principales étapes de la méthode de synthèse de plis dans le tableau 2.1.

Maillage	#Nbr de sommet	Point de semence de courbe (γ)	Point candidat (τ)	Approximation HRBF (s)	Calcul de l'angle A_v (ms)	Traçage des courbes (s)	#Nbr de sommet de plis	Génération de forme de plis (ms)	Totale (s)
Pantalon (Figure 2.17 ci-dessus)	4910	45	0.76	0.28	1.52	0.81	940	1.78	0.82
Chemise (Figure 2.17)	10000	75	0.33	0.45	1.68	0.92	3910	4.76	1.32
Chemise (Figure 2.18 (pose 1))	17507	30	0.76	0.57	1.70	0.76	3185	3.87	1.34
Combinaison (Figure 2.16)	19163	45	0.76	0.74	1.82	0.95	4800	5.13	1.70
Pantalon (Figure 2.20(a))	9989	120	0.8	0.33	1.57	1.07	3460	4.27	1.41
Pantalon (Figure 2.20(b))	9989	120	0.4	0.33	1.57	1.21	4210	4.95	1.55
Pantalon (Figure 2.21(a))	10108	75	0.38	0.41	1.60	0.87	1600	2.51	1.29
Pantalon (Figure 2.21(b))	10108	117	0.38	0.41	1.60	1.13	5300	5.68	1.55

Tableau 2-1 : Temps d'exécution des principales étapes de la méthode de synthèse de plis

Nous avons appliqué la méthode proposée sur divers modèles de vêtements. Les statistiques exposées dans le tableau 1 montrent le nombre de sommets de chaque maillage de vêtement, les paramètres d'entrée concernant la forme, la densité des plis, le temps d'exécution d'approximation HRBF et des étapes de création des plis.

D'après les résultats exposés dans le tableau 2.1, nous notons que la méthode d'ajout de plis proposée requiert des temps de calcul plus adaptés pour les outils de modélisation de vêtements. Cependant, son application directe aux animations de jeux vidéo reste encore trop coûteuse en temps de calcul. Comme nous pouvons remarquer, l'approximation HRBF et le traçage des

courbes sont clairement les étapes les plus couteuses en matière de temps d'exécution. Tandis que ces étapes peuvent être implémentées en parallèle sur un GPU programmable, et ainsi profiter d'une implémentation optimisée sur la carte graphique pour améliorer les performances. Nous pouvons en plus noter que le nombre de sommets projetés dépend principalement des valeurs de γ et τ.

2.5.2. Évaluation qualitative de la méthode d'ajout de plis

Dans ce paragraphe, nous exposons une gamme de vêtements qui sont traitées à l'aide de la méthode de synthèse des plis. Nous avons testé la méthode sur différents types de modèles de vêtements provenant principalement de deux sources : logiciels de modélisation 3D [20, 102] et la base de données de vêtements 3D *GarNet* proposé par [56].

2.5.2.1. Application sur des modèles serrés et amples

Nous avons testé l'ajout de plis sur deux exemples de vêtements serrés portés par un personnage. La figure 2.18 montre la simulation produite pour un modèle de T-shirt et un modèle de pantalon. Nous pouvons remarquer que les plis générés reflètent les caractéristiques intrinsèques du tissu déformé. De plus, les plis ajoutés pour chaque pose sont différents, ce qui donne une apparence plus réaliste de la déformation du modèle. En effet, en réalité les plis du tissu se forment et se modifient continuellement lors de l'animation.

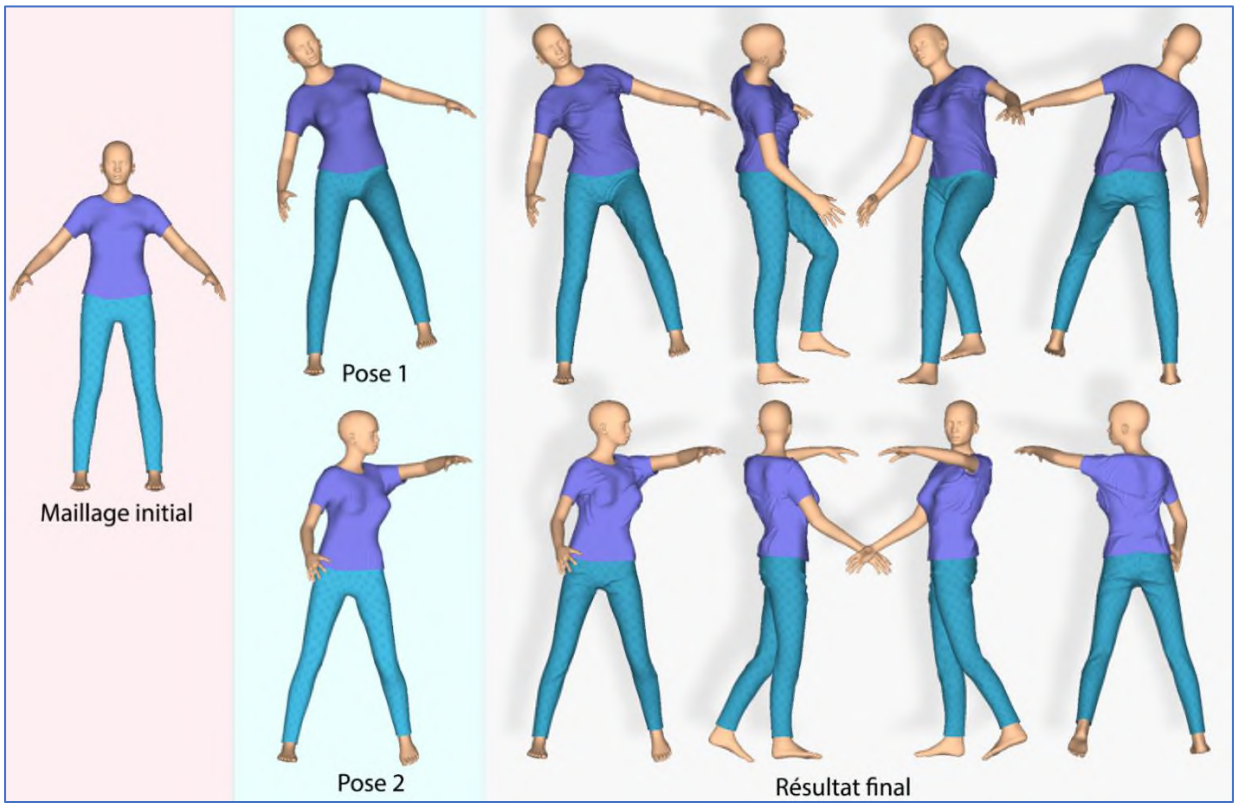


Figure 2-18 : Résultats de plissement de deux modèles serrés portés par un personnage pendant deux poses d'animation

Afin de montrer l'efficacité de la méthode d'ajout de plis pour le cas des vêtements amples comme une robe, nous l'avons testée sur deux modèles de robes portées par un personnage féminin. Comme on le voit sur la figure 2.19, les résultats montrent une dispersion plausible des plis sur la surface des maillages. Dans cet exemple, le maillage de robe est volontairement choisie flottante au niveau du bas de l'abdomen pour amplifier l'impression de mouvement d'inclinaison dynamique. Cette illustration montre différentes perspectives du personnage, ainsi cela prouve la polyvalence des plis réalisés sur la surface du tissu. Nous pouvons noter que les plis suivent le sens de déformation du maillage. Cela améliore clairement l'apparence et le dynamisme de la scène.

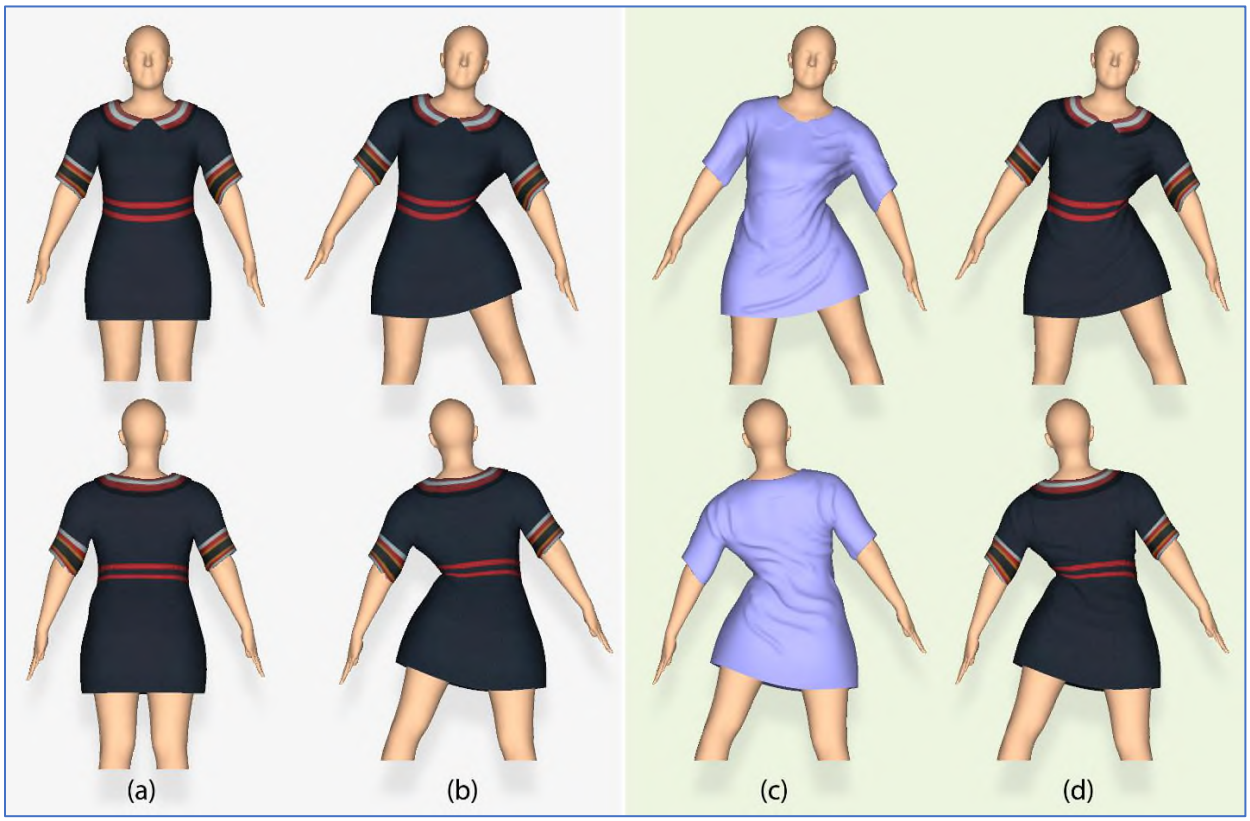


Figure 2-19 : Résultat d'ajout de plis sur un modèle de robe ; (a) modèle initial ; (b) modèle déformé ; (c) maillage avec des plis et (d) Modèle final

2.5.2.2. Evaluation des paramètres de contrôle des plis

Sur la figure 2.20 et la figure 2.21, nous montrons que la méthode d'ajout de plis proposée permet de contrôler l'aspect réaliste du tissu, ceci par le choix des paramètres de génération de plis (τ et γ). La figure 2.20 montre deux résultats d'ajout de plis sur un modèle de pantalon en utilisant deux différentes valeurs de seuil de point générateur candidat (Paragraphe 2.4.2). Spécifiquement, pour les simulations (a) et (b), le modèle du pantalon est simulé en utilisant respectivement $\tau = 0.8$ et $\tau = 0.4$, ainsi que nous maintenons la même valeur de $\gamma = 120$. Comme nous pouvons remarquer, le vêtement de la simulation (a) à une faible densité de plis que celui de la simulation (b).

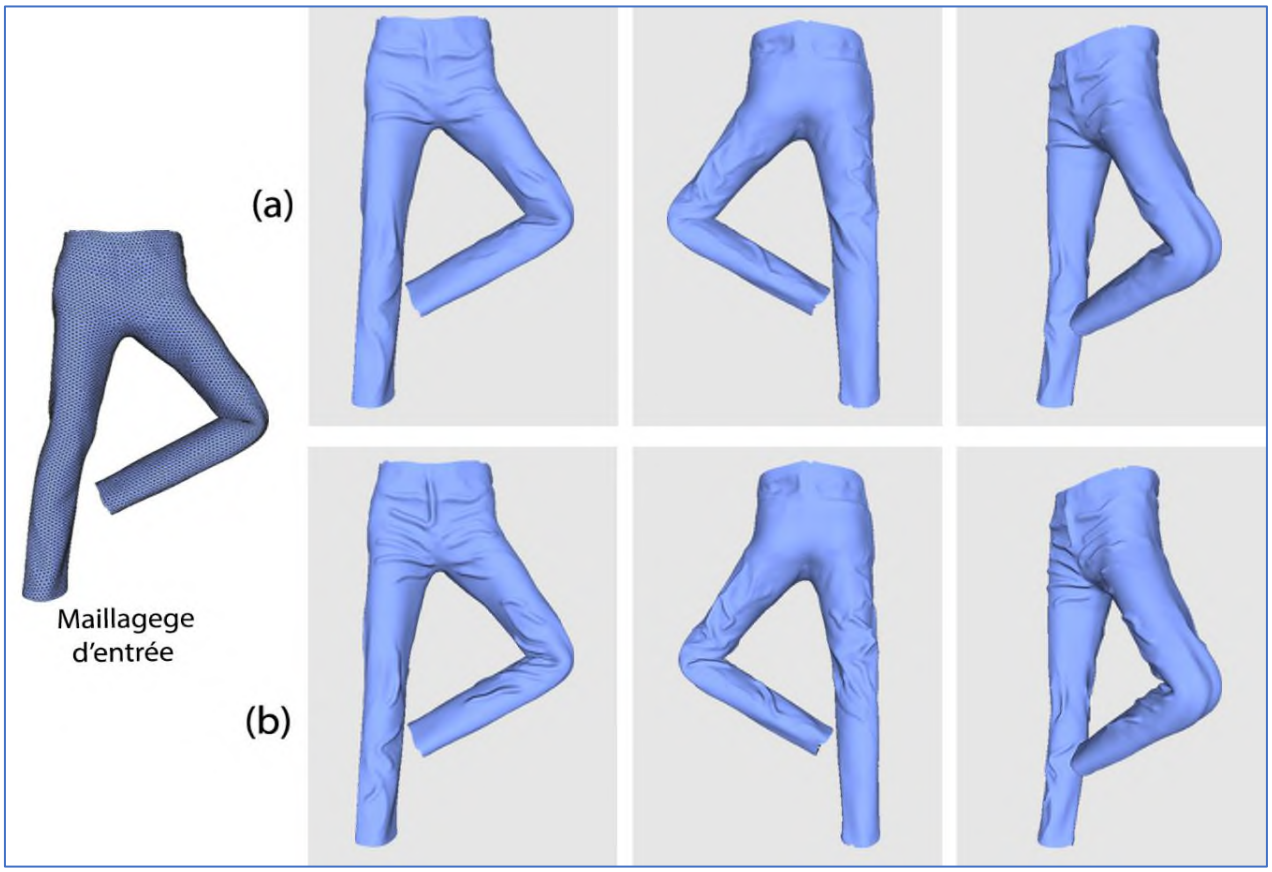


Figure 2-20 : Résultats d'ajout de plis pour un modèle de pantalon avec (a) $\tau = 0.8$ **et (b)** $\tau = 0.4$

La figure 2.21 montre l'impact de choix du paramètre de seuil de départ γ (Paragraphe 2.4.2) sur la région les plis générés. Nous montrons cet impact sur deux simulations d'un modèle de pantalon en utilisant deux valeurs différentes de seuil de départ, tout en maintenant la valeur de τ à 0.38. Pratiquement, les résultats des simulations (a) et (b) sont obtenus comme suit : le modèle du pantalon est simulé en considérant pour les deux simulations (a) et (b), $\gamma = 75$ et $\gamma = 117$ respectivement. D'après les résultats, nous pouvons remarquer que le nombre de région de plis est augmenté en passant de la simulation (a) à (b).

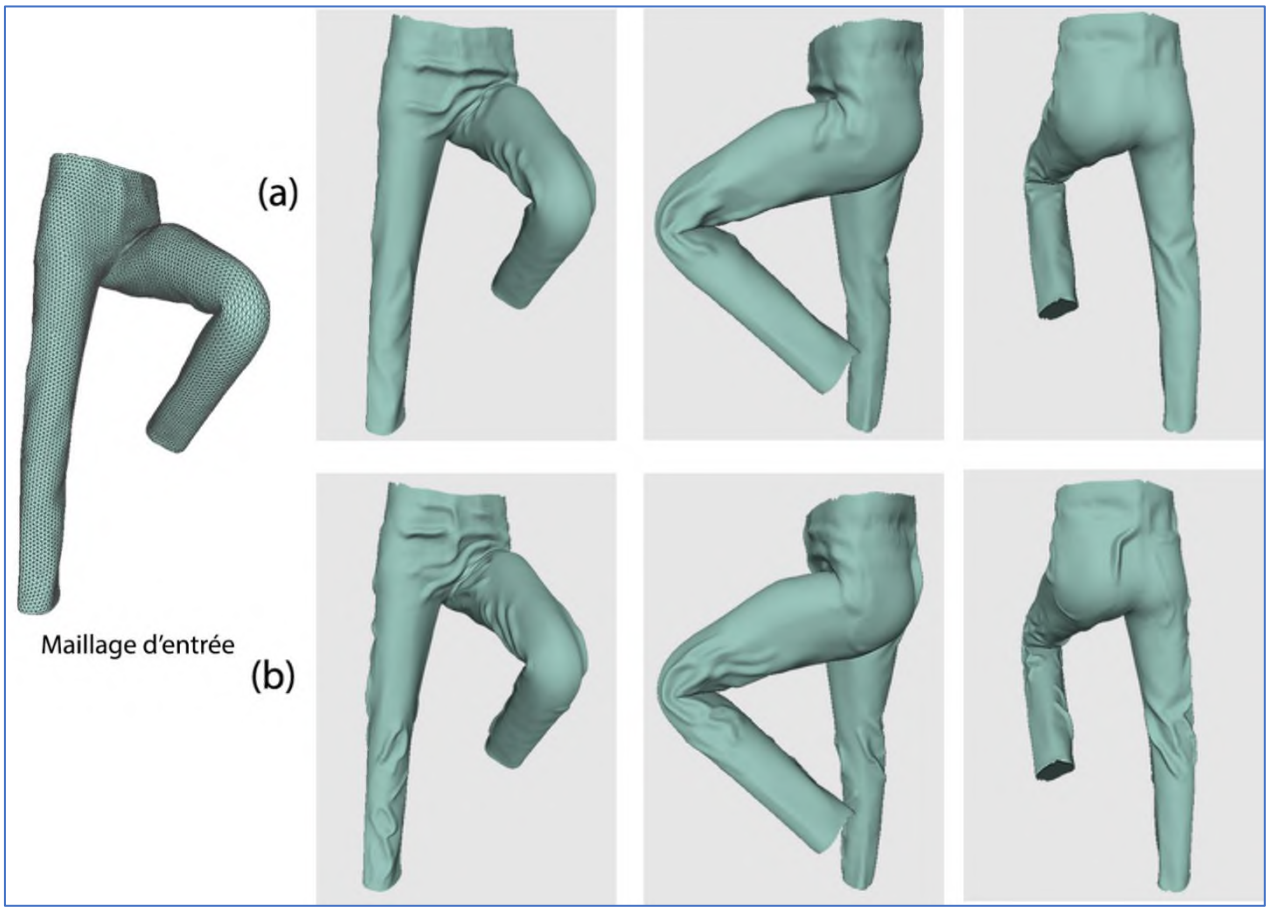


Figure 2-21 : Résultats d'ajout de plis pour un modèle de pantalon avec (a) $\gamma = 75$ **et (b)** $\gamma = 117$

2.5.2.3. Application sur des modèles en différentes résolutions

Comme illustré sur la figure 2.22, nous avons présenté les résultats d'application de notre approche sur trois modèles de chemise avec différentes résolutions, habillés par un même modèle de personnage. Les modèles de chemise sont issus de la base de *GarNet dataset* [56]. La simulation pour les trois modèles a été effectuée avec les mêmes paramètres d'entrée ($\gamma = 75$, $\tau = 0.39$).

D'après ces résultats, nous pouvons remarquer que le paramétrage que nous avons utilisé lors de la création de plis est mieux adapté aux modèles avec basse résolution. Nous pouvons aussi voir que le modèle avec la haute résolution est plus naturel, cela peut être parfaitement vu au niveau des articulations de la chemise ; par contre, le résultat du modèle à basse résolution est également satisfaisant. La seule explication de ces résultats, c'est que le nombre de sommets dans un maillage à un impact important sur le processus d'ajout de plis, en améliorant considérablement

le fusionnement de champs de plis sur la surface de vêtement, à chaque fois que la résolution du maillage augmente.

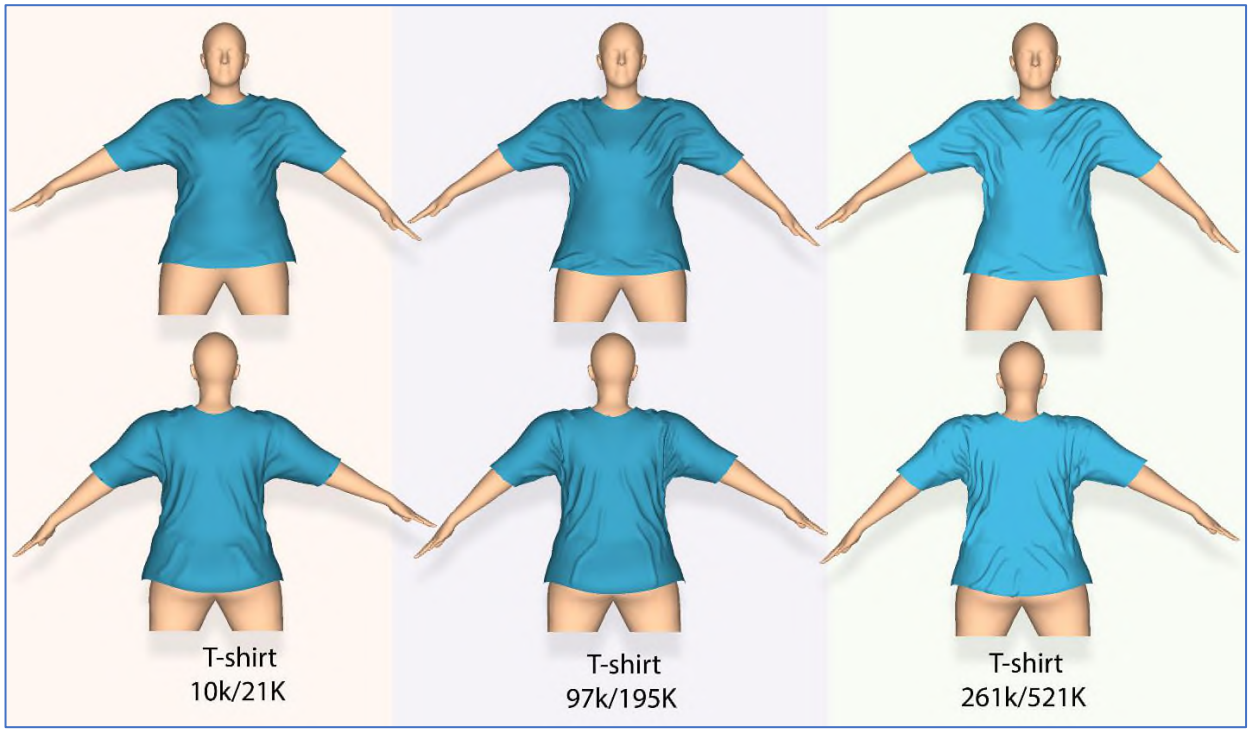


Figure 2-22 : Résultats d'ajout de plis sur trois résolutions d'un modèle de chemise ample ; Les statistiques représentent respectivement ; les sommets et les faces du maillage de chaque chemise

2.5.2.4. Apparence des plis lors de l'animation

Nous avons simulé l'ajout de plis sur une scène d'animation du vêtement porté par un personnage. Les trames de scène de cette animation ont été créées en utilisant le logiciel Blender [20]. Le modèle du vêtement utilisé issu de la base de *GarNet dataset* [56], correspond à un maillage non parfaitement développable. Nous avons également associé ceux-ci au corps du personnage sous le logiciel Blender.

La figure 2.23 montre trois trames successives d'animation d'un vêtement porté par un personnage animé. Les résultats sont présentés avant et après l'application de l'ajout de plis. Nous pouvons remarquer que le processus de synthèse de plis améliore la crédibilité de la visualisation ainsi que l'impression de dynamique. Notons que pour les vêtements des trois trames, la génération de plis est effectuée avec les mêmes paramètres d'entrée ($\gamma = 83,\ \tau = 0.4$). Ce paramétrage donne ainsi l'impression que le vêtement est constitué d'un tissu très fin de type soie avec de nombreux plis. D'après les résultats de simulation des trois trames illustrées sur la figure

2.23, nous pouvons noter que l'ensemble des plis ajoutés améliore nettement le dynamisme de l'animation du modèle.

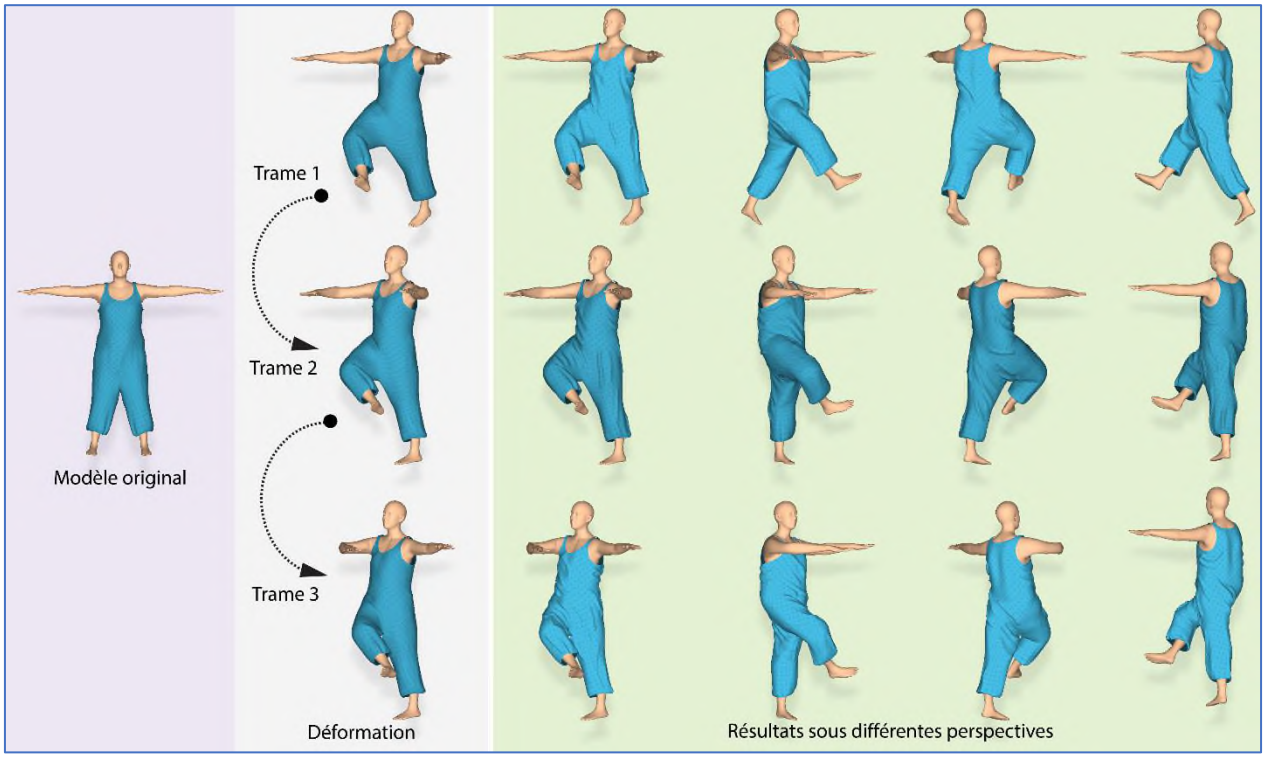


Figure 2-23 : Résultat d'animation d'un vêtement porté par un personnage pendant trois trames d'animation.

2.5.3. Comparaison et discussion

Dans l'objectif de déterminer la position de notre approche parmi les approches d'ajout de plis. Nous avons effectué une comparaison avec les approches récemment proposées dans ce contexte. Cette comparaison détaillée dans les tableaux 2.2 et 2.3, a été mené suivant six critères :

1. Les exigences de la méthode en matière de données d'entrée ;
2. Le type du maillage du vêtement pris en charge par la méthode ;
3. Le contrôle de la direction du froissement ;
4. La gestion de collisions des plis ;
5. Le contrôle d'utilisateur sur la forme des plis ;
6. L'automatisation de la méthode.

Approche	Exigence d'entrée	Modèles de vêtements supportés	Contrôle de direction des plis
Li et al. [94]	– Séquence d'animation (personnage habillé). – Contraintes de contact entre le corps et le tissu.	Différents types	Manquant
Han et al. [60]	– Base d'image 2D de vêtement.	Différents types	Manquant
Wang et al. [150]	– Croquis de conception en 2D. – Modèle de vêtements en pattern 2D.	Trois types de vêtements : Jupe, chemise, kimono	Les plis suivent le tracé de croquis
Santisteban et al. [124]	– Base de vêtements de taille unique avec un tissu spécifique.	Modèle de Jupe	Les plis dépendent de la pose du corps
Gundogdu et al. [56]	– Maillage de tissu en basse résolution. – Maillage du vêtement lisse. – Maillage de détails.	Modèles de vêtements amples	Manquant
Rohmer et al. [122] Gillette et al. [51]	– Maillage initial du vêtement comme référence. – Maillage du vêtement déformé.	Modèles de vêtements serrés	Les plis suivent le sens de la compression
Notre méthode	– Maillage du personnage. – Squelette d'animation. – Modèle du vêtement.	Modèles de vêtements avec une forme fermée	Les courbes de plis sont tracés suivant le mécanisme décrit en (Paragraphe 2.4.2)

Tableau 2-2 : Comparaison avec les méthodes similaires récemment publiées en termes d'exigence d'entrée, modèles de vêtements supportés et le contrôle de la direction des plis

Suite à cette comparaison, nous pouvons noter que les données d'entrée de la méthode de synthèse proposée sont les plus simple à obtenir, ce qui augmente l'applicabilité de notre méthode. De plus, elle est entièrement automatique, contrairement à l'approche de traçage de courbes proposée par Wang et al. [150]. Bien que l'approche proposée par [124] permet d'obtenir des résultats visiblement proches aux plis dans la vraie vie, elle est très limitée en matière de type de vêtements supportés (modèle semblable à la jupe).

Approches	Gestion de collision entre plis	Contrôle utilisateur	Méthode automatique ?
Li et al. [90]	Gérée à l'aide de contrainte de proximité	Manquant	Oui
Han et al. [60]	Manquant	Manquant	Oui
Wang et al. [150] Li et al [94]	Manquant	L'utilisateur trace l'esquisse d'entrée et définit les pattern 2D du tissu	Non
Santisteban et al. [124]	Pas entièrement géré	Manquant	Oui
Gundogdu et al. [56]	Non garanti	Manquant	Oui
Rohmer et al. [122] Gillette et al. [51]	Gérée par l'utilisation d'une distance de décalage	L'utilisateur contrôle la largeur et la profondeur des plis	Oui
Notre méthode	Gérée à l'aide de distance imposée entre les courbes (Paragraphe 2.4.3)	Notre méthode offre plusieurs paramètres de contrôle de plis : forme, densité, hauteurs ...	Oui

Tableau 2-3 : Comparaison avec des méthodes similaires

2.5.3.1. Comparaison aux méthodes physiques

Comme illustré sur la figure 2.24, nous avons évalué visuellement la qualité de nos modèles. Nous avons comparé nos résultats avec ceux des méthodes de simulation basées sur des lois physiques (chapitre 1). Pour cette comparaison, nous avons choisi les approches proposées par

[108, 90]. D'après les résultats de simulation, nous remarquons que les plis créés par l'approche de synthèse de plis sont assez proches de ceux de la simulation physique.

Nous notons qu'une comparaison exacte avec les méthodes physiques, n'est pas facile car les conditions requises ne sont pas identiques. En effet, dans le cas de la simulation physique, le tissu subit une importante subdivision [90]. Une telle subdivision du modèle de tissu masse-ressort permet de modifier son comportement et le rendre plus flexible et plus proche de la déformation d'un tissu dans la vie réelle. Malgré cela, les approches de simulation physique brute nécessitent un coût prohibitif en matière de temps machine [136].

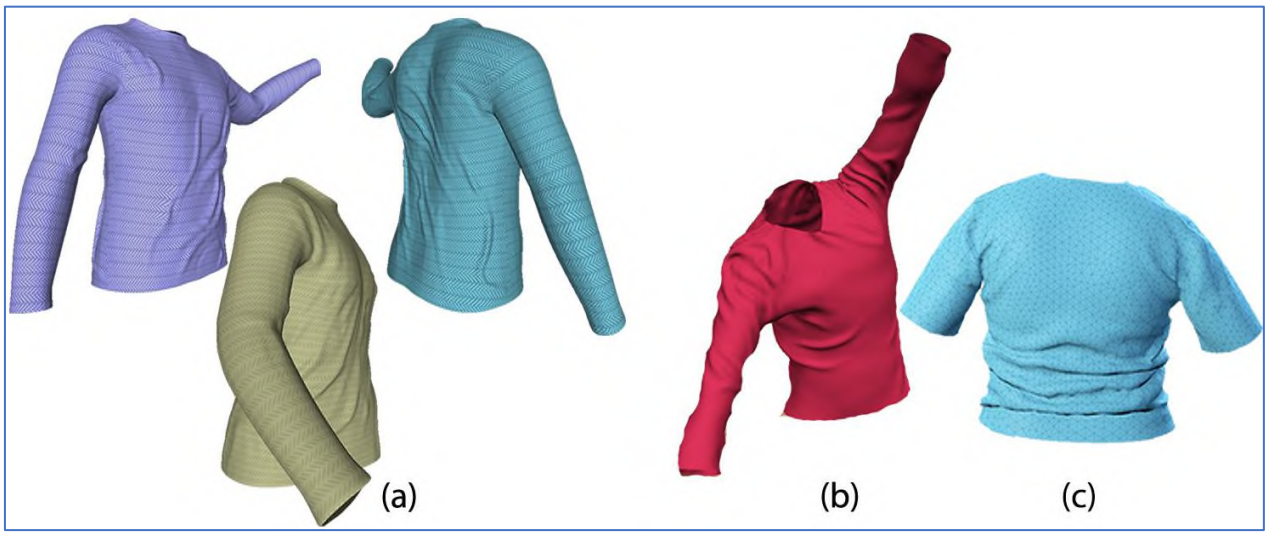


Figure 2-24 : Comparaison de nos résultats (a) avec deux méthodes de simulation physique (b) [108] et (c) [90]

Bien que notre approche s'inscrive dans la catégorie des approches qui utilisent la méthode d'enrobage pour déformer le modèle de vêtement, elle est différente au niveau de l'utilisation de l'étape de suivi de surface effectuée après une déformation standard (Paragraphe 2.3.3). Cette étape permet d'éviter deux problèmes majeurs causés par l'enrobage standard à savoir : l'auto pénétration dans le maillage après la déformation et l'effet d'élasticité extrême. Pour comparer la simulation générée à l'aide de la méthode de synthèse de plis avec celle des approches basées sur l'enrobage classique, nous avons choisi la comparaison avec la méthode de Guan et al. [55].

Pratiquement, nous avons effectué la comparaison avec deux simulations d'un modèle de pantalon (4718 sommets / 9283 faces) et une chemise (10116 sommets / 20017 faces) issu de la base de Multi-garment Network Dataset [19]. En utilisant la méthode [55], la transformation

considérable du corps rend le vêtement déformé dans un état fortement échevelé. Ceci représente un problème, car la résolution des auto-collisions dans un tel état n'est pas une tâche facile. De plus, une méthode classique d'enrobage peut également engendrer des compressions ou étirements irréalistes dans des parties du maillage (figure 2.25 (a)). En effet, la simulation physique d'un maillage sévèrement déformé loin de son état initial, conserve une grande énergie potentielle dans le système. Ce potentiel est converti en énergie cinématique qui augmente la vitesse des sommets, même si nous essayons de ramener le modèle de tissu donné par [55], à son état initial. C'est une tâche très difficile, car ce processus génère des oscillations excessives et des divergences de résolution dans le maillage. Par contre notre méthode permet de surmonter tous ces inconvénients causés par une simulation basée sur l'enrobage standard (figure 2.25 (b)).

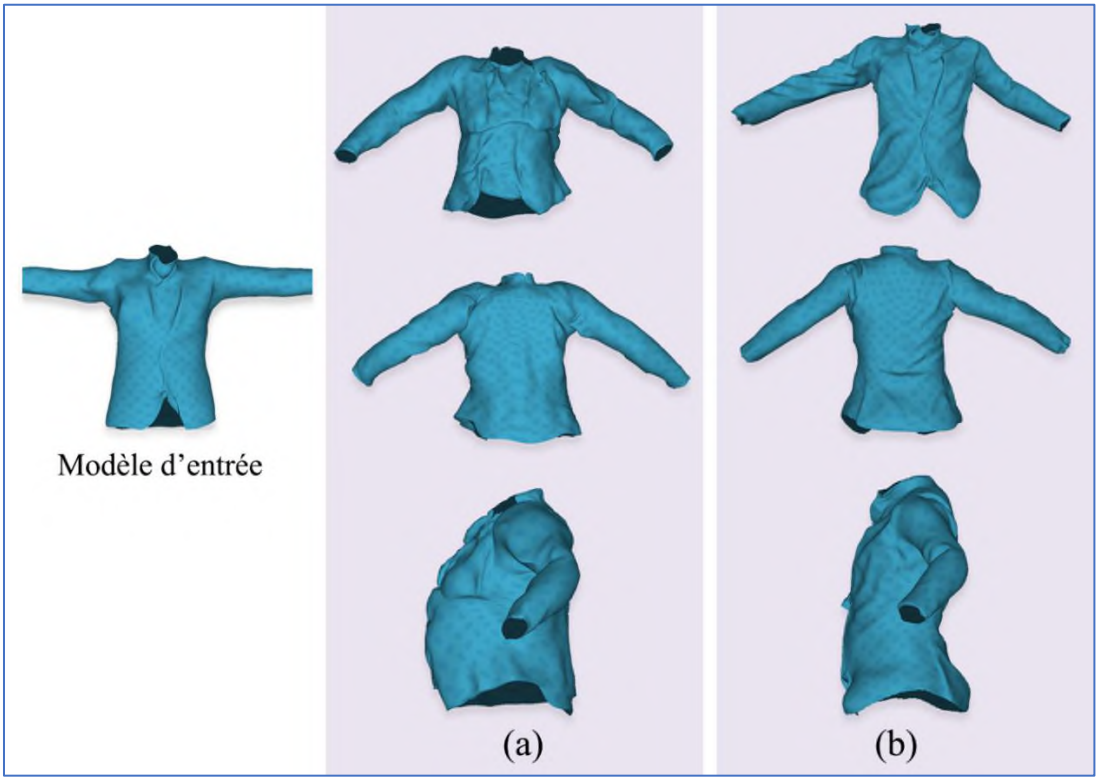


Figure 2-25 : Comparaison avec la méthode de [55] ; (a) Résultats de [55] ; (b) Résultats de simulation avec la méthode d'ajout de plis

2.5.3.2. Comparaison avec des méthodes à base de croquis

Les approches de [150, 94] reposent sur l'idée de créer des détails sur le vêtement à l'aide de croquis dessinés par l'utilisateur. Cependant, ces méthodes ne sont pas en mesure de simuler des détails sur un maillage de tissu préexistant en 3D, ni d'inclure des plis dans des endroits

spécifiques. En revanche, la méthode d'ajout de plis permet de traiter n'importe quel maillage de tissu lisse en 3D sans avoir besoin de "pattern" 2D (figure 2.26).

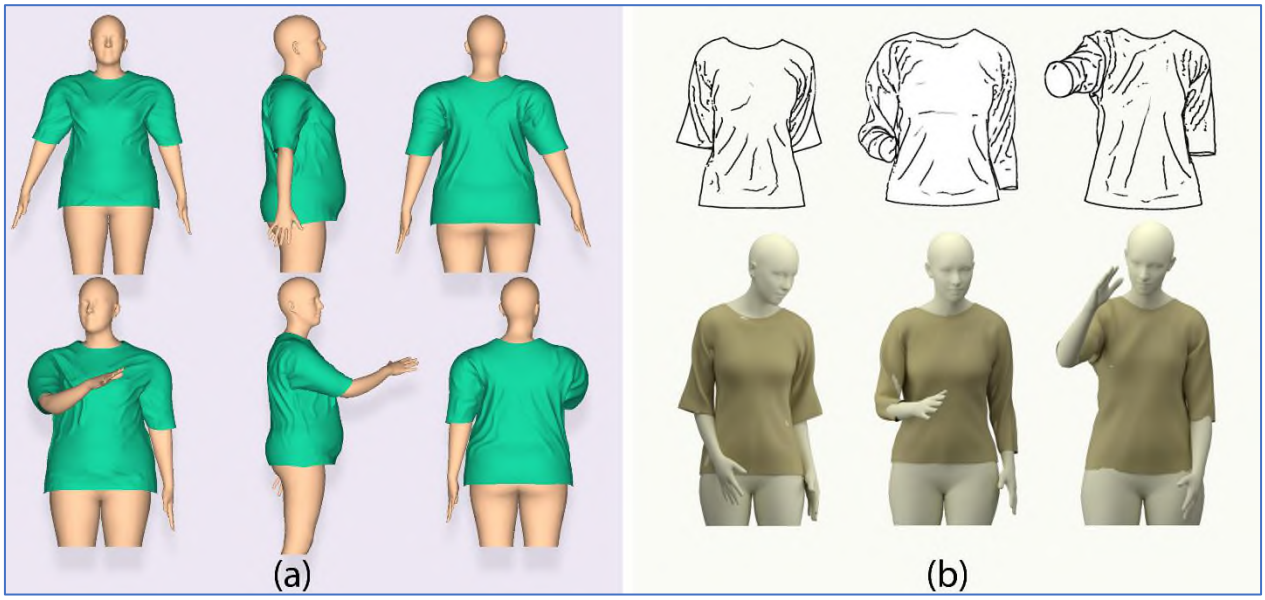


Figure 2-26 : Comparaison entre la méthode d'ajout de plis (a) et la méthode basée sur des croquis de Wang et al. [150] (b)

2.5.3.3. Comparaison avec des méthodes d'augmentation géométriques

Nous avons comparé les méthodes d'augmentation géométriques de plis [122, 51] avec notre méthode (figure 2.27). Ces approches génèrent des plis en se basant sur des courbes tracées dans l'espace de surface du tissu, où l'amplitude du champ de vecteurs qui reflète une quantité de compression. Elles reposent fortement sur l'existence d'un maillage de référence comme guide pour la génération des courbes de plis (Annexe A). Bien que nous ayons adopté la même stratégie de génération de courbes, notre proposition ne nécessite aucun maillage de référence.

Les plis dans la vie réelle ont des formes de profil complexes, ils varient considérablement tout au long de la surface du vêtement ; ainsi, comme le montre la figure 2.27 (a) et (b), on remarque la présence des plis de taille moyenne avec un ajustement global dans les résultats de [122, 51]. Ainsi, nous pouvons remarquer dans nos résultats, la présence de plis plausibles dans la région du ventre, ils apparaissent lorsque le personnage lève la main. En revanche, les résultats produits par [122, 51] ne fournissent qu'une approximation grossière des plis dans cette région.

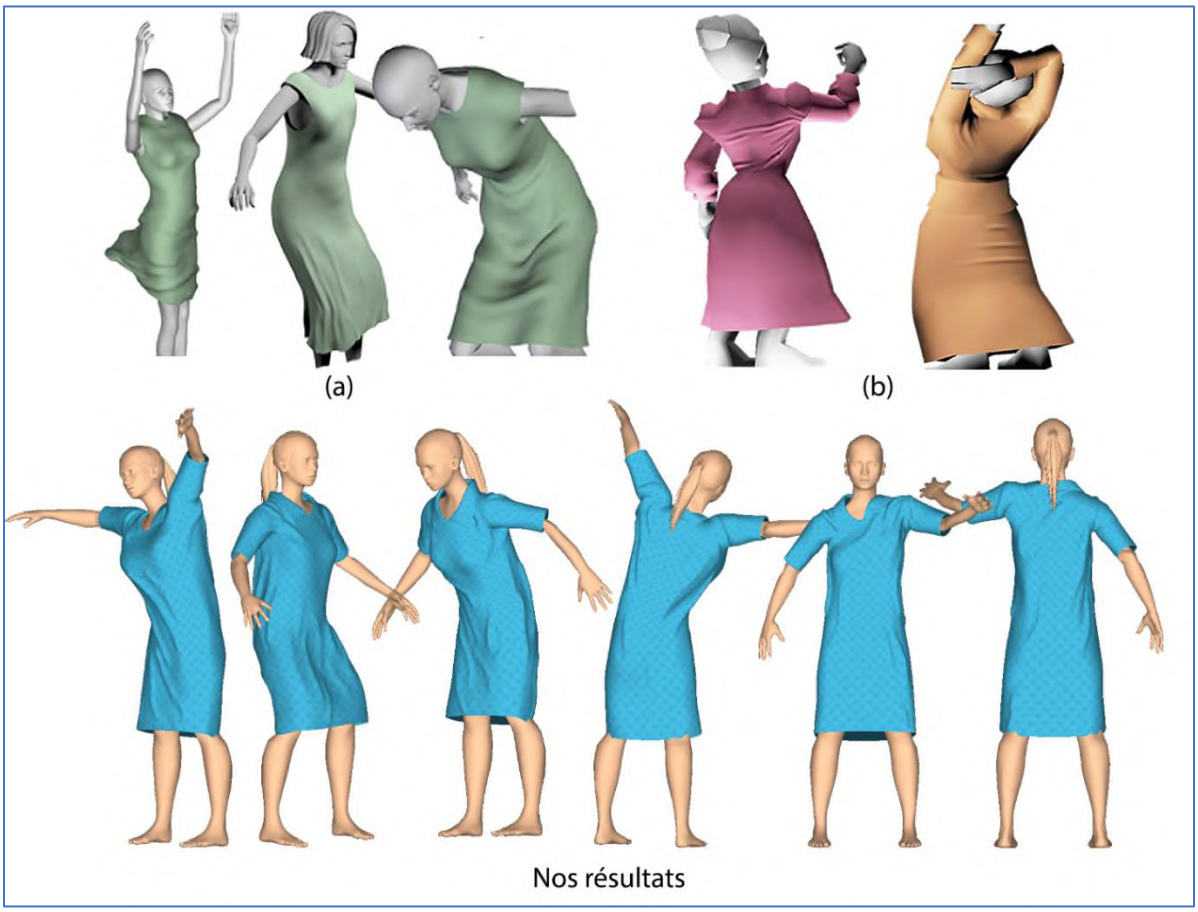


Figure 2-27 : Comparaison avec les méthodes d'augmentation géométrique ; (a) proposition de [122] ; (b) proposition de [51]

2.5.3.4. Comparaison avec des méthodes de *Data-driven*

La figure 2.28, montre une comparaison qualitative avec les méthodes en *"Data-driven"* récemment proposées [148, 140, 120]. Ces méthodes ajoutent des plis au tissu en utilisant une interpolation des échantillons pré simulés de plis (*Annexe* ***A***). Bien que les résultats de ces approches puissent être visuellement crédibles, il est important de noter que la forme et l'apparence de ces plis dépendent largement de la taille de la base de données. En plus, l'idée de l'utilisation d'échantillons donne aux plis une apparence statique lors de l'animation. En outre, les méthodes en *"Data-driven"* sont plus appropriées pour plisser une animation de tissu avec une conception et des poses similaires aux échantillons dans la base. Par contre, la méthode d'ajout de plis permet d'atteindre un niveau de précision de plis important, et elle ne nécessite aucune base d'échantillons, ni de base d'images de tissu comme dans la proposition de [59].

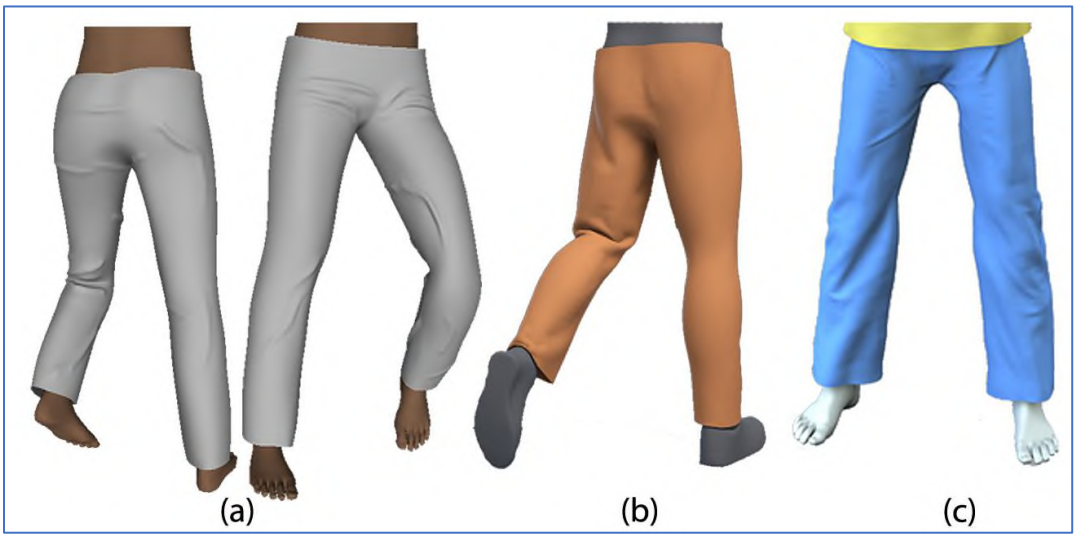


Figure 2-28 : Comparaison de la simulation d'ajout de plis(a) avec les résultats des approches en data-driven (b) [59] ; (c) [140]

2.6. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté une méthode pratique pour ajouter des plis au tissu porté par un personnage animé. La méthode proposée fonctionne comme une étape de post-traitement du maillage de vêtement déformé. Nous avons détaillé ses différentes étapes, puis nous avons présenté les résultats obtenus sur un ensemble de modèles de vêtements. Nous avons aussi, comparé ces résultats avec ceux des autres méthodes récemment publiées dans ce contexte. Les résultats des simulations et des comparaisons sont très satisfaisants. Les différentes expérimentations effectuées sur des maillages de vêtements avec différents paramètres de contrôle de plis montrent, d'une part, la qualité de la simulation produite par la méthode d'ajout de plis et d'autre part, l'impact de ce paramétrage sur les résultats obtenus. Les résultats sont encourageants surtout que la méthode proposée s'adapte parfaitement avec les vêtements qui enveloppent le corps de personnage animé. Comme le montrent les résultats de simulation, l'utilisation de la reconstruction HRBF comme moyen d'ajout de plis au maillage a prouvé son efficacité pour simuler des plis avec un aspect réaliste, ainsi de bien gérer les auto-collisions dans la région de plissement et de préserver les détails originaux de la forme initiale du maillage. Notre méthode fournit un ensemble de paramètres manipulables par l'utilisateur afin de contrôler l'apparence des plis résultants et ainsi d'obtenir le résultat souhaité. L'approche que nous avons proposée est plus rapide qu'une simulation physique classique.

Chapitre 3

Positionnement de vêtements 3D sur un corps humain à l'aide du squelette d'animation et des fonctions à base radiale d'Hermite.

3.1. Introduction

La récente explosion des réseaux sociaux pousse les gens à redoubler le temps d'interactivité en ligne. Par conséquent, le niveau d'interactivité des consommateurs en ligne avec les entreprises de vêtements augmente avec une large utilisation des applications d'achat en ligne, de divertissements et des cabines d'essayage virtuelles. L'essayage virtuel contribue fortement à l'acte d'achat en ligne des vêtements par les consommateurs. Ainsi, les techniques de modélisation 3D sont largement utilisées dans ce contexte, en particulier pour automatiser le positionnement personnalisé, la prédiction de la taille et le prototypage des vêtements. Un bon positionnement d'un modèle du vêtement 3D sur un corps humain est une étape cruciale pour les applications d'essayage virtuel.

Ce processus de positionnement nécessite de nombreuses tâches qui prennent beaucoup de temps, principalement à cause de la différence au niveau de la structure et de la posture entre le modèle du corps cible et le vêtement. La recherche en essayage virtuel est devenue un sujet d'actualité dans le domaine de la réalité virtuelle. Au cours des dernières années, il y a eu un grand nombre de propositions dans ce sujet, qui peuvent être classés en deux catégories : premièrement, les approches basées sur la modélisation par morceaux de tissu 2D [76, 156]. Ces approches utilisent des applications CAO (*Conception assistée par ordinateur*) pour superposer des modèles 2D sur la surface du corps qui sont ensuite convertis en maillage 3D. Malgré les résultats convaincants des données CAO dans le positionnement et la simulation des vêtements, ces approches nécessitent une grande base de données de morceaux de tissu 2D qui n'est pas toujours disponible dans les applications d'essayage. Deuxièmement, les approches qui effectuent le positionnement directement à partir des maillages 3D de vêtements [110, 87, 128]. Ces approches requièrent en entrée, un maillage du vêtement porté par un corps de référence et le maillage du corps cible. Ces

approches s'intéressent principalement à la recherche de la correspondance entre le corps de référence et le corps cible. Cependant, sans la présence du modèle de référence, ces méthodes ne sont pas applicables.

En général, un système d'essayage virtuel doit répondre à cinq critères importants. Premièrement, le vêtement doit s'adapter au modèle humain dans différentes postures. Deuxièmement, le résultat du positionnement doit indiquer les caractéristiques intrinsèques du vêtement. Troisièmement, le système d'essayage virtuel est censé assurer un degré de contrôle pour l'utilisateur. Quatrièmement, les données d'entrée d'un tel système doivent être simples et disponibles, c'est-à-dire que les informations d'entrée doivent être faciles à obtenir. Cinquièmement, le temps d'exécution du système doit être suffisamment raisonnable pour une application interactive.

En s'appuyant sur les cinq critères cités ci-dessus, nous avons proposé un système d'ajustement virtuel basé sur la déformation par squelette du vêtement [161]. Afin d'assurer la correspondance de la posture entre le vêtement et le modèle humain, la déformation est effectuée avec l'approximation HRBF. En effet, nous représentons le maillage du vêtement en utilisant la convention de reconstruction HRBF (chapitre 2 paragraphe 2.3). Cette approximation est ensuite utilisée pour guider la déformation du vêtement, ce qui permet d'éviter l'utilisation d'un corps de référence supplémentaire pour déformer le vêtement.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit : le paragraphe 3.2 présente un aperçu général de la méthode de positionnement. Le paragraphe 3.3 expose le processus d'intégration du squelette dans le maillage du personnage et du vêtement. Dans le paragraphe 3.4, nous avons détaillé les différentes étapes d'alignement de la posture du vêtement avec celle du personnage. Le paragraphe 3.5 décrit les étapes de transfert du vêtement vers le modèle humain. Le paragraphe 3.6 expose les différents résultats d'application de la méthode de positionnement ainsi que les résultats de comparaisons avec les autres méthodes similaires. Le paragraphe 3.7 présente les performances en temps d'exécution de la méthode.

3.2. Aperçu général sur la méthode de positionnement

En général, la déformation des vêtements suit de près la déformation du corps humain. Ce qui permet de traiter directement les modèles de vêtements comme des modèles articulés. Parmi une grande variété de méthodes, la déformation par squelette est considérée comme la méthode la

plus intuitive et la plus facile à utiliser pour l'ajustement de la posture d'un modèle 3D (chapitre 1 partie 1.4.2.4).

Dans ce paragraphe, nous décrivons un nouveau système de positionnement de vêtements sur un modèle du corps humain 3D. Le pipeline de la méthode de positionnement est illustré sur la figure 3.1. En entrée, le système de positionnement proposé requiert seulement un modèle du corps humain et un modèle du vêtement. Le modèle humain peut provenir de diverses sources (modélisation 3D, scanner …), nous ne supposons donc pas une relation de correspondance initiale entre les deux modèles. Comme idée de base, nous déformons le modèle du vêtement afin qu'il soit aligné avec le corps cible. Pour cela, nous commençons par intégrer des squelettes dans les maillages des deux modèles (corps et vêtement), ensuite, nous appliquons une série de opérations d'alignement et d'ajustement de longueur sur le squelette du vêtement afin qu'il soit aligné avec celui du corps humain.

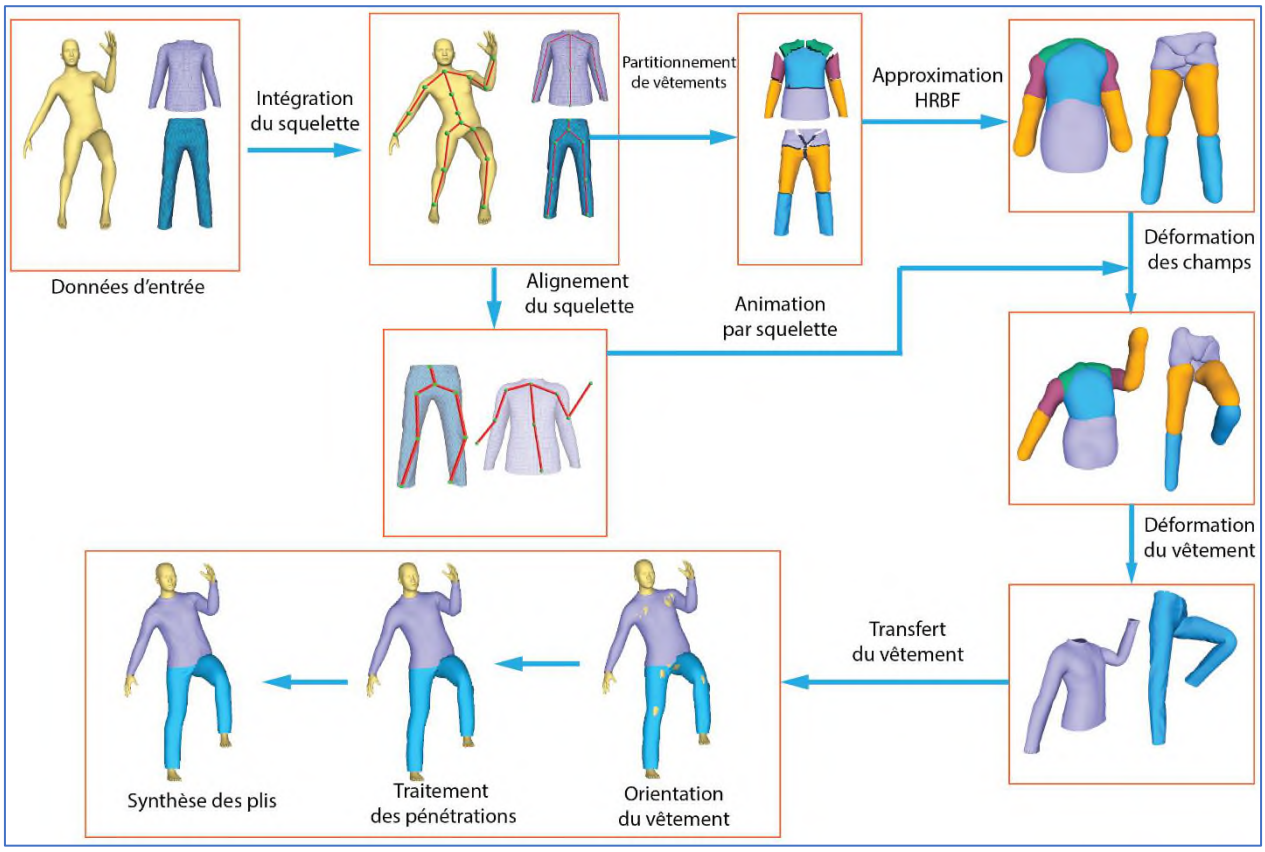


Figure 3-1:Pipeline de la méthode du positionnement.

La plupart des approches dans ce contexte adoptent l'idée du transfert de vêtements vers le modèle humain [142, 105 27]. Elles sont basées principalement sur quatre grandes étapes, à

savoir la manipulation de la pose du modèle humain, la correspondance entre les formes, le positionnement du vêtement sur le modèle humain et la gestion des collisions entre les deux modèles. Nous pouvons remarquer que la simple hypothèse que le corps humain et le vêtement ont une posture similaire, comme il est supposé dans les travaux de [105, 27], n'est pas toujours réalisable dans les applications d'essayage de vêtements.

La déformation d'un maillage en suivant la posture d'un autre maillage peut être vue comme un problème du recalage de formes 3D non rigides (*non-rigid 3D shape registration*) dont l'objectif est de trouver la correspondance entre les formes. Dans un recalage 3D parfait, le modèle du vêtement peut être déformé vers une posture exactement identique à celle du modèle humain. Cependant, la plupart des méthodes de recalage non-rigide ne garantissent pas une correspondance exacte de posture ; ainsi, la gestion des pénétrations entre les deux maillages peut être difficile à réaliser.

Bien que les méthodes de recalage 3D non rigide soient un choix intuitif, nous adoptons une approche de déformation par squelette guidée par une approximation HRBF pour déformer le vêtement. Cette déformation permet de réduire l'impact de la contrainte de correspondance. En effet, lorsque les deux modèles ont des postures presque similaires, l'étape de gestion des pénétrations sera plus facile.

Comme le montre la figure 3.1, le pipeline d'ajustement se compose des étapes suivantes :

1. **Intégration du squelette.** Dans un premier temps, nous intégrons deux squelettes ayant exactement la même structure, dans les deux maillages (vêtement et corps). Une fois l'intégration réussie, le calcul de l'attachement d'enrobage (skinning) de chaque maillage avec son squelette est effectué à l'aide de l'approche basée sur le graphe de Reeb et la théorie de Morse [61].
2. **Approximation HRBF du vêtement.** Dans cette étape, nous segmentons le maillage du vêtement en partitions selon le poids d'influence de chaque os sur les sommets du maillage. Ensuite, nous utilisons l'approximation HRBF pour représenter les parties du vêtement avec une surface implicite par morceaux (chapitre 2 paragraphe 2.3).
3. **Alignement des squelettes et déformation du vêtement.** L'alignement du squelette du vêtement avec celui du corps nécessite le calcul des rotations appropriées pour chaque articulation. Nous considérons la rotation d'articulation comme des composantes

d'oscillation et de torsion, qui sont calculées indépendamment. La transformation initiale de squelette du vêtement est effectuée en utilisant la méthode de déformation par DQS. La déformation du vêtement est guidée par le processus de suivi des sommets (chapitre 2 partie 2.3).

4. **Transfert du vêtement.** Une fois que la posture du vêtement soit alignée avec celle de modèle humain, nous corrigeons toutes les pénétrations probables entre le corps et le vêtement. Enfin, nous effectuons un ajout de plis sur le maillage du vêtement, afin d'obtenir une forme du modèle plus réaliste.

3.3. Intégration du squelette dans les maillages

Pour intégrer un squelette d'animation à l'intérieur du personnage, nous avons essayé d'utiliser une technique de boîte noire pour l'intégration automatique de squelette (*black-box rigging*) [58], mais c'est loin d'être un bon choix dans notre cas. Nous pouvons noter que la technique d'intégration automatique (*automatic rigging*) proposée par Baran et al. [16], a réussi pour la plupart des modèles avec une symétrie verticale. Cependant, pour les modèles asymétriques, comme dans le cas des vêtements déformés, cette technique produit des résultats inappropriés qui demandent une intervention de l'utilisateur à chaque fois pour corriger les positions des articulations. Même les solutions disponibles dans les outils professionnels présentent divers problèmes d'intégration de squelette, car elles demandent un haut degré d'expertise de la part de l'utilisateur. Pour cela, nous avons décidé d'adopter un nouveau système d'intégration de squelette.

Nous avons mis en place un système similaire à la proposition de Pasko et al [109], qui est basé sur le graphe de Reeb et la théorie de Morse [61]. En utilisant la fonction de Morse comme distance géodésique de deux points sur la surface, cinq points caractéristiques du modèle sont d'abord extraits automatiquement. Le modèle est ensuite partitionné, et toutes les articulations sont calculées en évaluant la fonction circulaire des lignes géodésiques du modèle. Cependant, en suivant ce processus, nous avons remarqué que parfois plusieurs points caractéristiques sont obtenus en position près d'une articulation, et ce problème n'a pas été résolu dans la proposition de [109]. Nous avons résolu ce problème en utilisant l'algorithme de clustering K-means [147] pour obtenir un seul point à chaque articulation. En utilisant les étapes ci-dessus, le système de positionnement est capable de spécifier automatiquement tous les points d'articulation. Ces

articulations peuvent nécessiter un ajustement manuel, en particulier pour les modèles dont la pose est non canonique. De la même manière, la position des articulations sera encore manipulée par l'utilisateur si les rotations des articulations entraînent une distorsion inhabituelle du maillage. La figure 3.2 illustre les résultats générés par la proposition de Baran et al. [16] et par notre méthode. Nous pouvons noter que les points caractéristiques se trouvent à l'intérieur du modèle, et non sur la surface du maillage.

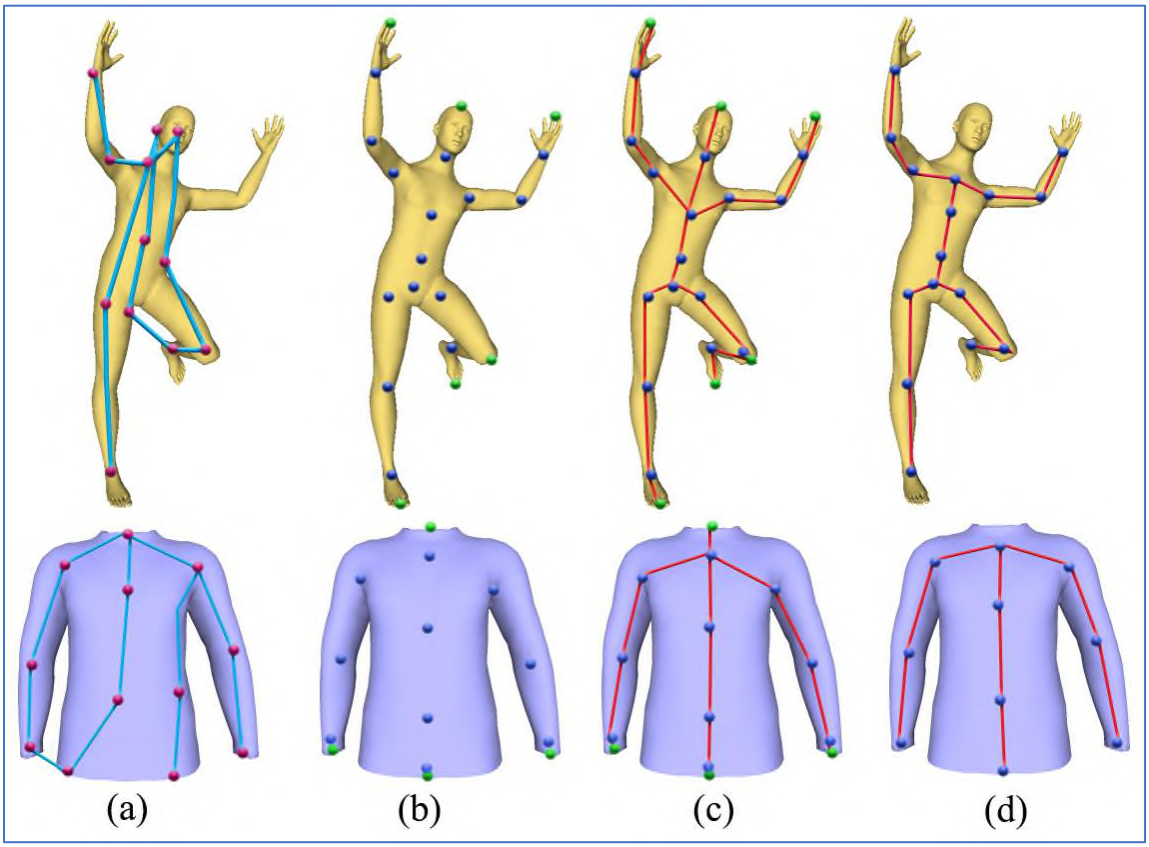


Figure 3-2: (a) Squelette intégré avec l'approche [16] ; (b) L'extraction de points caractéristiques (vert), puis l'ajout de points supplémentaires comme jointures (bleu) ; (c) le squelette conçu en joignant automatiquement ces points ; (d) le squelette résultant

3.4. Alignement de la posture du vêtement avec celle du corps

L'objectif de cette étape est de déformer le vêtement pour qu'il s'adapte à la posture du modèle humain. Le principal défi est de déformer le vêtement sans perte de volume ni auto-intersection au niveau des articulations. Notre idée clé est d'exploiter la capacité des représentations implicites pour modéliser le contact et préserver les propriétés originales du maillage à l'aide des surfaces implicites. Dans cette contribution, nous avons suivi le même processus de déformation du vêtement utilisé dans la méthode d'ajout des plis présentée dans le chapitre 2. Nous avons donc

partitionné le maillage du vêtement suivant les articulations de son squelette. Puis, nous avons utilisé les fonctions HRBF pour représenter chaque segment du maillage avec l'iso-surface 0,5 d'une fonction de champ scalaire lisse f_i. Ensuite, nous combinons ces fonctions de champ scalaire f_i pour obtenir une fonction de champ scalaire unique F.

Après l'approximation du vêtement, le processus de déformation commence par une étape d'alignement d'orientation du squelette avec celui du corps cible, ce qui nous donne à la fin la nouvelle posture du vêtement qui est similaire à celle du corps.

3.4.1. Alignement des squelettes

En informatique graphique, une rotation 3D est généralement constituée de plusieurs composantes, elle peut être représentée en différentes manières (par exemple, la représentation de l'angle d'Euler).

Dans notre cas, nous décomposons la rotation R de l'articulation en deux composantes, à savoir l'oscillation (swing) et la torsion (twist) : $R = ST$, où la partie d'oscillation S est la rotation d'un os b par rapport à la normale du plan défini par l'intersection de b avec son os parent, et la partie de torsion T est la rotation de l'os b par rapport à son axe.

Pour chaque articulation de squelette, les deux composantes sont alignées séparément en utilisant différentes techniques. Nous présentons d'abord la technique permettant d'obtenir l'oscillation à partir de deux postures du squelette, puis nous décrirons celle utilisée pour obtenir la torsion.

En algèbre linéaire, deux opérateurs M et N sous une base différente, sont dits similaires s'il existe une matrice non singulière P telle que : $N = P^{-1}MP$.

Pour le cas du mouvement des os du squelette, nous notons M la rotation d'un os b par rapport au repère global, P l'orientation de l'os parent de b et N la même rotation de b représentée par rapport à son os parent. La transformation inverse de b est donnée comme suit :

$$M = PNP^{-1} \quad (3.1)$$

Cette transformation inverse permet de transformer une représentation dans un repère local vers un repère global. Dans ce contexte, nous voulons ajuster les orientations de squelette du vêtement afin qu'ils correspondent à celle du corps cible.

Nous initialisons d'abord chaque os par une rotation locale R_{init}. Bien que nous puissions choisir arbitrairement les rotations R_{init}, nous les avons choisis alignés avec le repère global afin de faciliter le processus de suivi. L'algorithme 1 représente un pseudo-code de l'ajustement de la partie oscillante. Pour le symbole $R^t_{p(i)}$, l'exposant t indique la rotation totale d'un os (combinaison des rotations de ses os associés), par rapport au repère global, et l'indice $p(i)$ indique le parent de l'os b_i. Nous pouvons noter que le squelette intégré utilise un degré de liberté (DOF) faible, c'est-à-dire que le degré de liberté de chaque articulation (ou os) n'est pas égal à six, car nous ne disposons pas d'information sur l'orientation. Par conséquent, la matrice M_j utilisée dans l'étape de dépouillement par quaternion double (Annexe C) ne peut pas être initialisée correctement pour la pose de départ. En d'autres termes, les informations d'oscillation (swing) ne sont pas suffisantes pour définir la torsion (twist) d'un os, et ne peuvent donc pas décrire la posture de l'os avec précision. Cela pose également des problèmes lors du reprofilage du mouvement, même avec l'aide d'un expert.

Afin de générer la torsion des os d'un squelette à faible degré de liberté, nous utilisons des données de mouvement ou de pose capturées à l'aide d'enregistrement de l'orientation de chaque os. Plus précisément, en utilisant le système de capture du mouvement, nous prenons comme données d'entrée, la première pose égale à celle de squelette du corps, puis la deuxième pose égale à celle de squelette du vêtement. Pour chaque paire d'os identique (par exemple deux jambes gauches), nous calculons la rotation relative et locale R_i^m pour passer de la pose de l'os du corps à celle de l'os du vêtement. Cette rotation relative est ensuite transformée en une représentation dans le repère global à l'aide de l'équation 3.1, puis elle est décomposée en deux parties : l'oscillation S_i^m et la torsion T_i^m. Nous combinons T_i^m avec S_i pour obtenir une nouvelle rotation $Q_i = S_i T_i^m$, et nous abandonnons S_i^m à cause de son faible impact.

Algorithme 3.1 : Alignement des squelettes
1. Créer une file d'attente U **2.** Ajouter b_0^g l'os de la racine de squelette du vêtement à U ainsi que tous ces os descendants.

3. Initialiser les rotations des os du vêtement : $R^g_{p(0)} = R_{init}$

4. Pour tout $b_i^g \in U$ **faire**

5. Calculer le vecteur unitaire u_i pour b_i^g // Ce calcul est effectué par rapport au repère global

6. Calculer le vecteur unitaire u_i^r pour un os b_i^b correspond dans le squelette du corps // par rapport au repère global

7. **Pour chaque paire** $\left(b_i^b, b_i^g\right)$ **faire**

8. Trouver l'axe de rotation $R_{axis} = u_i^r \times u_i$

9. Trouver l'angle de rotation $\theta = \arccos\left(u_i^r . u_i\right)$

10. Former la matrice d'oscillation S_i par rapport au repère global.

11. **Fin pour**

12. Calculer la torsion T_i^m à partir d'un système de capture de mouvement.

13. Calculer $Q_i = S_i T_i^m$

14. Représenter Q_i par rapport au repère local : $Q_i' = \left(R^t_{p(i)}\right)^{-1} Q_i R^t_{p(i)}$

15. Mettre à jour les orientations locales et globales : $R_i' = Q_i' R_{init}$ et $R_i^t = R^t_{p(i)} R_i'$

16. Ajouter à U tous les os descendants de b_i^g.

17. Fin pour

3.4.2. Déformation de vêtement

Après avoir calculé la rotation totale pour chaque os de squelette du vêtement, nous pouvons facilement le déformer pour obtenir une pose similaire à celle du corps. Pour cela, nous appliquons les transformations R_i^t de chaque os à son champ HRBF associé f_i. Cette étape de déformation est similaire au processus présenté dans le chapitre 2 (paragraphe 2.3.3). Dans le cas présent, la transformation est donnée par :

$$\begin{cases} f_i(p) = f_i\left(\left(R_i^t\right)^{-1} p\right) \\ \nabla f_i(p) = J_R\left(R_i^t\right)\nabla f_i\left(\left(R_i^t\right)^{-1} p\right) \end{cases} \quad (3.2)$$

où J_R est la matrice jacobienne de R_i^t .

Cette déformation est suivie d'une étape de relaxation tangentielle, afin d'améliorer le déplacement des sommets et d'éviter les lacunes causées par la projection des sommets (chapitre 2 paragraphe 2.3.3).

3.5. Transfert de vêtement

Dans le présent paragraphe, nous décrivons les étapes de transfert du vêtement vers le modèle humain. Après la déformation du maillage du vêtement. Tout d'abord, nous déplaçons le vêtement déformé vers sa partie correspondante dans le maillage humain de manière grossière en se basant sur les points caractéristiques des squelettes. Ensuite, nous éliminons les pénétrations probables entre les deux maillages. Enfin, nous effectuons une synthèse des plis sur le vêtement, afin d'obtenir une forme plus réaliste.

3.5.1. Ajustement de l'orientation du vêtement

Une fois que le nouveau modèle du vêtement déformé soit obtenu, sa posture sera alignée avec le modèle humain. Cependant, dans certains cas, l'orientation du vêtement et celle du corps ne sont pas forcément cohérentes, en d'autres termes, le maillage du corps ne fait pas directement face au vêtement, ceci est principalement dû à l'étape de déformation du vêtement. Pour éviter ce problème d'orientation, nous ajustons l'orientation du vêtement avec celle du corps après l'étape de déformation (figure 3.3).

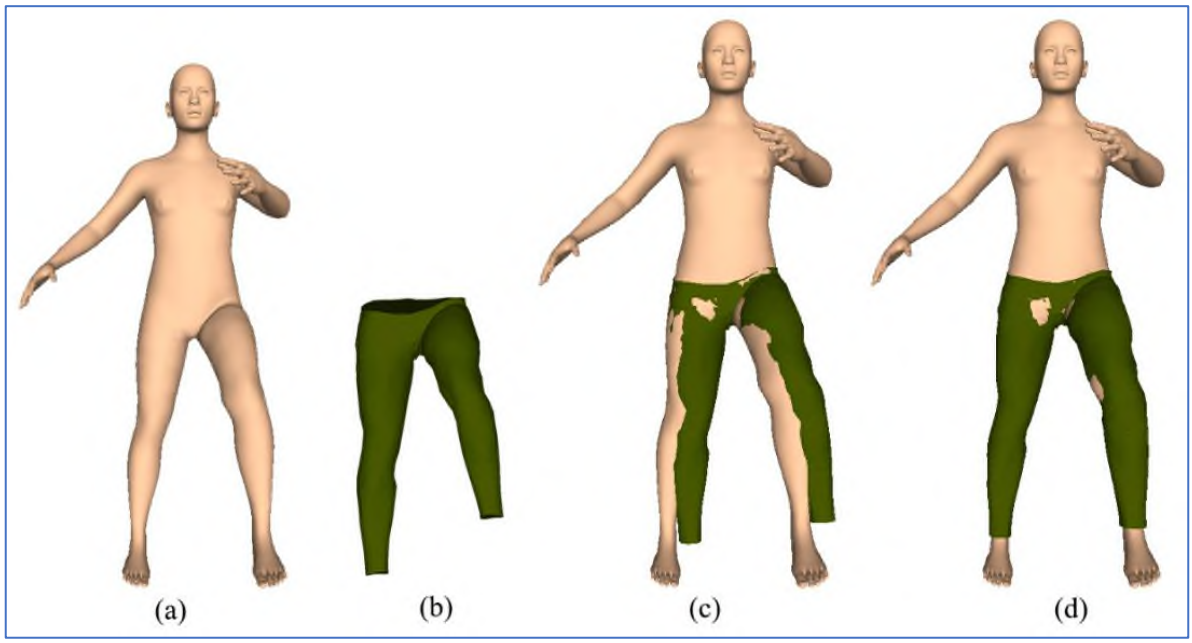


Figure 3-3 : (a) corps ciblé ; (b) vêtement déformé ; (c) alignement sans ajustement de l'orientation. (d) alignement après l'ajustement de l'orientation

L'orientation d'un modèle du vêtement peut être effectuée en utilisant un vecteur vertical V_v^g et un vecteur horizontal V_h^g. Par conséquent, suivant les articulations clés choisies dans les squelettes des deux modèles, comme le montre la figure 3.4, nous pouvons définir les orientations du vêtement et du corps respectivement comme suit : $D_g = \left(V_v^g, V_h^g\right)$ et $D_b = \left(V_v^b, V_h^b\right)$.

Le calcul des vecteurs d'orientation dans le cas de deux modèles s'effectue de manière similaire, si nous prenons comme exemple D_g, il peut être calculé comme suit :

$$D_g : \begin{cases} V_h^g = N\left(J_2^g - J_1^g\right) \\ V_v^g = N\left(J_3^g - \dfrac{J_2^g + J_1^g}{2}\right) \end{cases} \quad (3.3)$$

où la fonction $N(x)$ est la normalisation d'un vecteur x, et J_1^g, J_2^g et J_3^g sont les articulations clés de squelette du vêtement.

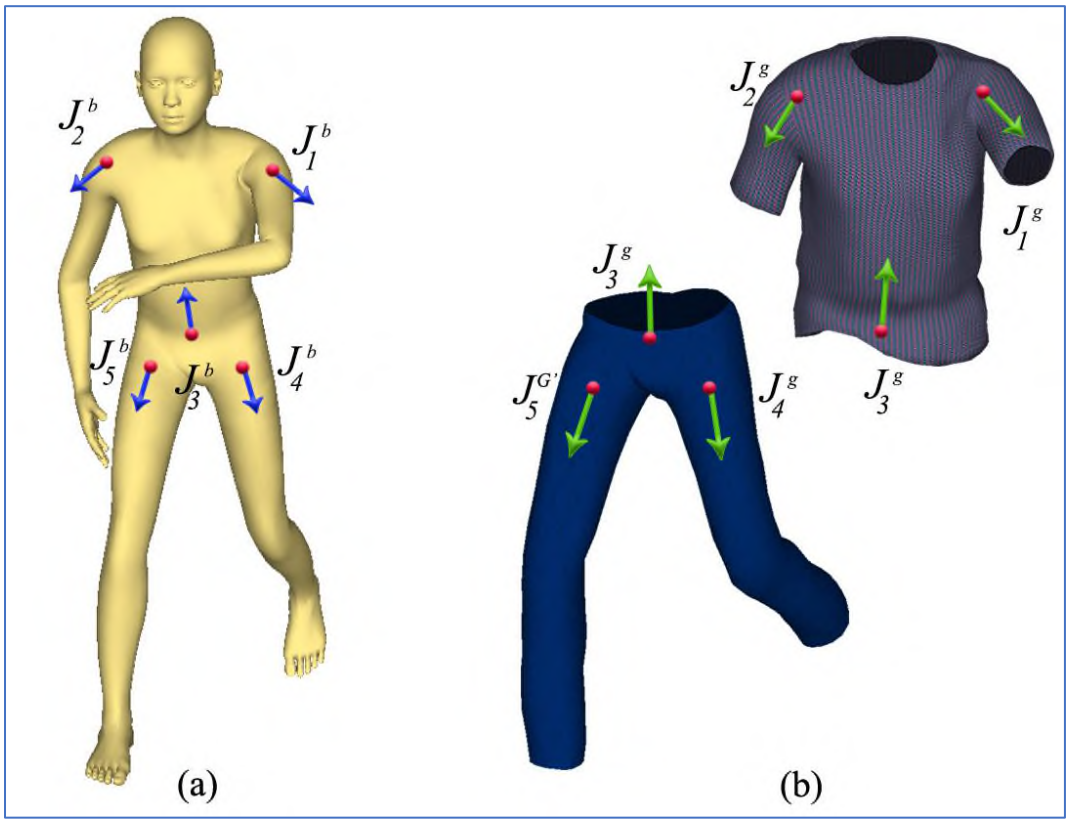


Figure 3-4 : Articulations utilisées pour le processus d'orientation ; (a) pour le corps ; (b) pour le vêtement déformé

Dans le processus d'orientation, nous définissons deux matrices de rotation R_v et R_h associées respectivement aux vecteurs V_v et V_h. Ainsi, nous appliquons R_h au vecteur V_h^g pour le rendre égal à V_h^b, et du même R_v est appliqué au vecteur V_v^g pour le rendre égal à V_v^b.

Nous adoptons le concept formule de rotation de *Rodrigues* [121] pour formuler ces deux rotations. Pour cela, nous avons besoin de deux paramètres : l'axe de rotation R_{axe} et l'angle de rotation θ, qui sont calculés comme suit :

$$R_{axe} = \frac{V_h^g \times V_h^b}{\left\| V_h^g \times V_h^b \right\|} \quad (3.4)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{V_h^g . V_h^b}{V_h^g \times V_h^b} \right) \quad (3.5)$$

Par conséquent, la rotation globale appliquée sur le vêtement peut être formulée comme la matrice $R = R_h R_v$. La figure 3.3 (d) ci-avant illustre l'ajustement final de l'orientation du vêtement avec celle du corps.

3.5.2. Gestion des pénétrations

Après que le modèle du vêtement soit déformé et positionné sur le modèle humain, le résultat obtenu peut être encore insatisfaisant, à cause des pénétrations qui apparaissent généralement entre les deux modèles (figure 3.5(a)). Ceci est dû à une correspondance insuffisante ou à la forme originale complexe du vêtement. Heureusement, les pénétrations peuvent être éliminées de manière simple par des algorithmes de gestion des collisions [155]. Nous éliminons ces problèmes par un ajustement de la forme du vêtement après l'étape d'orientation. Pour cela, nous avons besoin d'une méthode qui prend en compte à la fois le résultat de l'orientation et les pénétrations qui surgissent.

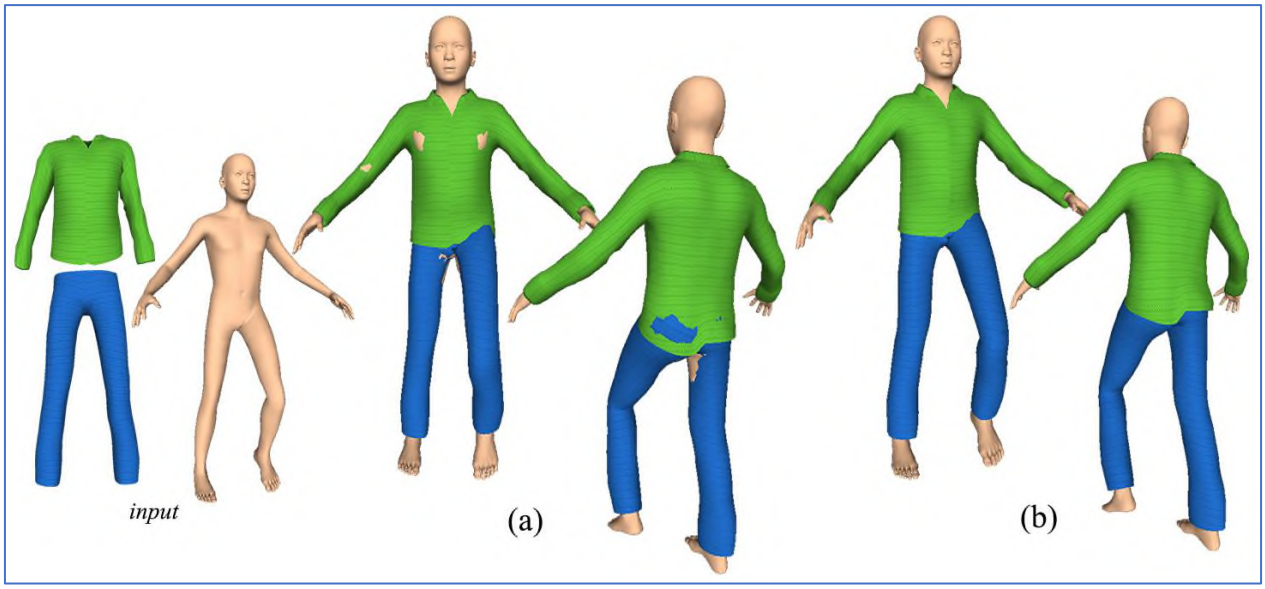


Figure 3-5 : Exemple de traitement de la pénétration ; (a) modèle avec des pénétrations ; (b) modèle après la correction des pénétrations

La proposition de Ye et al. [152] offre un cadre qui répond à nos exigences, ainsi nous l'avons adoptée dans notre système de positionnement. Nous pouvons noter que le succès de la correction des collisions entre deux maillages dépend essentiellement de leur structure géométrique. Or, cette approche basée sur le démêlage présente des limites liées à l'enregistrement (apprentissage) des collisions à chaque étape de déformation [152]. Davantage, l'utilisation de l'étape de

déformation du vêtement comme post-traitement et par la suite l'étape d'orientation permet d'augmentent les chances de convergence de cette approche.

Nous pouvons noter que le maillage de modèle humain peut être aminci jusqu'à ce que son squelette coïncide avec celui de vêtement, ce qui diminue davantage le nombre des régions de pénétration à éliminer. Dans nos expériences, l'amincissement (modification des proportions du maillage) est rarement effectué, sauf dans certains cas extrêmes.

La figure 3.5 montre que le vêtement aligné avec le corps est affecté par des pénétrations dans plusieurs régions. Nous pouvons noter qu'avant d'appliquer le processus de résolution des pénétrations entre le vêtement et le corps, nous avons réduit le volume proportionnelle du corps de 5%. Ceci permet de déminuer le nombre des pénétrations et rendre leur élimination plus facile.

3.5.3. Apparence du vêtement

Comme illustré sur la figure 3.5 (b), lorsque les opérations de l'ajustement du vêtement et de l'élimination des pénétrations avec le corps soient terminées, on obtient un modèle humain habillé. Cependant, l'apparence de ce modèle résultant peut être vue comme irréaliste à cause de l'absence des détails (plis) sur la surface du maillage de vêtement.
Dans un système de positionnement, toute variation du vêtement doit générer une apparence réaliste du tissu. Cela diverge totalement des autres approches de déformation géométrique [157, 93, 87], qui ajoutent des faux plis au vêtement pour lui donner une apparence plus proche de la réalité.

Nous avons utilisé la méthode de synthèse de plis (chapitre 2), qui permet de profiter de l'existence des champs HRBF utilisés dans la déformation du vêtement, pour générer des plis sur la surface du maillage. En effet, en calculant l'angle entre les gradients de deux champs HRBF successifs, elle génère un champ vectoriel utilisé ensuite pour tracer des courbes de plis. Ces courbes de plis sont transformées en plis géométriques à l'aide des surfaces de convolution. La figure 3.5 illustre le modèle du corps habillé après l'application de l'étape d'ajout de plis.

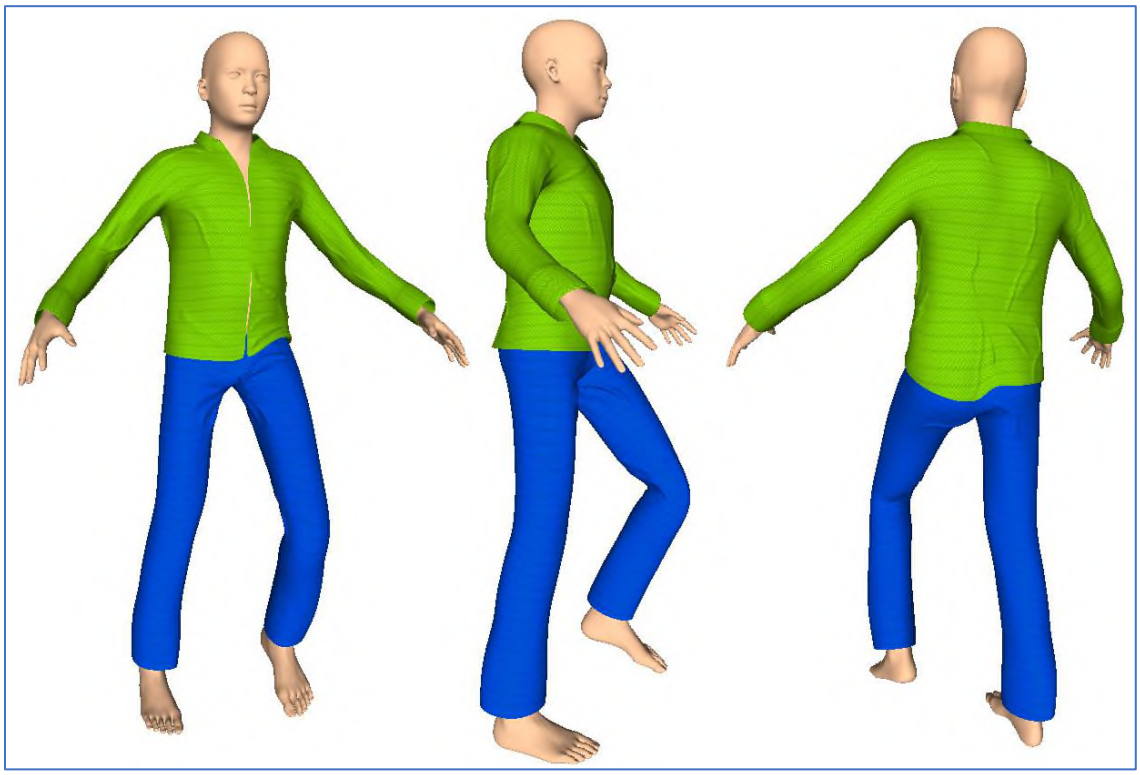


Figure 3-6 : Modèle final après l'application du processus de synthèse des plis

3.6. Résultats et validation

Dans ce paragraphe, nous montrons l'efficacité et la robustesse du système de positionnement proposé avec son application sur une série de modèles de corps humain et de vêtements différents. Nous utilisons 18 modèles de vêtements provenant de trois sources : *GarNet* [56], *Multi-garment Network* [19] et un logiciel de modélisation 3D [20]. Nous utilisons dix-sept modèles humains issus des bases de données *SMPL* [98], *SCAPE* [9] et du logiciel *MakeHuman* [102]. Nous avons testé notre système avec différentes configurations d'ajustement à savoir : le cas du corps habillé par différents types de vêtements et le cas du modèle de vêtement positionné sur plusieurs corps. En considérant chaque positionnement d'un ensemble de vêtements sur un corps comme une simulation, nous avons effectué au total 38 tests de simulation.

D'après nos expériences, il n'y a que quelques cas qui sont générés avec certains problèmes. Nous pouvons noter que certains modèles du corps humain nécessitent plus d'intervention manuelle de la part de l'utilisateur afin que le squelette soit correctement intégré. Certains modèles du vêtement issu de la base de SMPL sont plus compliqués, ce qui rend l'auto-extraction des positions d'articulation moins satisfaisante, d'où la nécessite de la manipulation manuelle de ces

articulations par l'utilisateur. Pour la plupart des modèles issus des bases de *GarNet* et *Multi-garment Network*, les résultats du processus de déformation HRBF sont plus satisfaisants.

3.6.1. Résultats des simulations

- **Habillage de corps avec différentes formes du maillage**

La figure 3.7 montre les résultats de positionnement de deux modèles de vêtements (T-shirt, pantalon), sur trois modèles humains avec une même posture et des formes différentes (mince, standard, gros).

Les spectres de déplacement illustrés à droite de la figure 3.7, montrent les régions de vêtements affectées par la déformation et la synthèse des plis. Dans la plupart des systèmes d'essayage virtuel, le corps cible est généralement issu d'une capture corporelle 3D (scanner), les postures numérisées des utilisateurs sont principalement en position A ou T. Nous pouvons noter que dans ce cas, l'intégration du squelette est réalisée facilement à cause de la structure simple de ces postures, bien qu'un petit ajustement dans certains cas soit nécessaire.

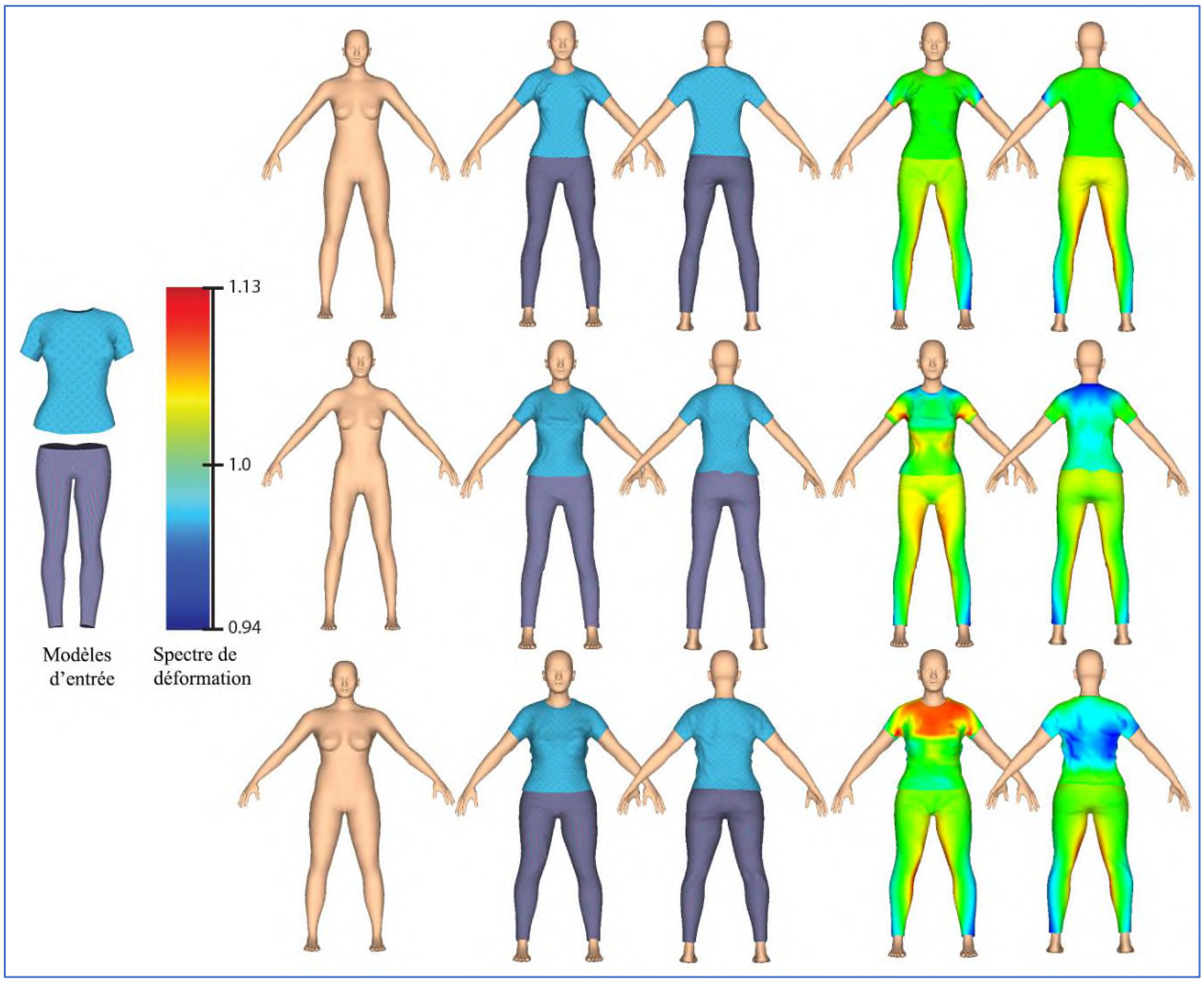


Figure 3-7 : Ajustement de vêtements sur trois corps humains ayant des poids différents

La figure 3.8 illustre les résultats de positionnement de deux pièces de vêtements, sur sept modèles humains ayant une même posture et des tailles différentes. Le squelette est intégré automatiquement à l'aide du processus d'intégration, de sorte que toutes les étapes du processus soient effectuées sans aucune intervention manuelle. Les deux pièces de vêtements sont déformées avec succès à l'aide de la méthode de déformation HRBF. La surface des corps habillés est lisse, et tous les problèmes de pénétration (Figure 3.8) sont éliminés avec succès.

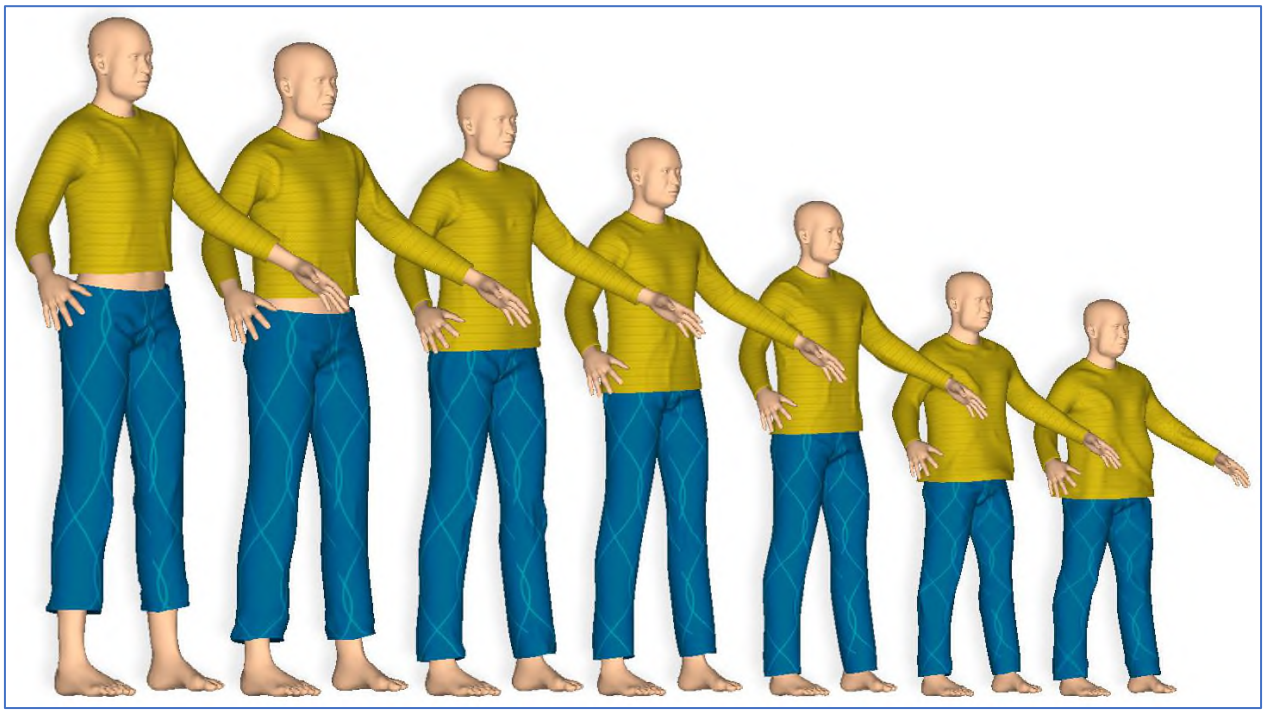


Figure 3-8 : Positionnement de deux modèles de vêtements sur sept corps humains ayant des tailles différentes

- **Habillage d'un même corps avec des vêtements différents**

La figure 3.9 montre les résultats d'habillage d'un même corps féminin, avec différents types de vêtements. D'après l'apparence visuelle, les modèles semblent être mieux transférés sur la surface du corps. Nous pouvons noter que le système de positionnement basé sur la déformation HRBF est mieux adapté aux vêtements avec une structure fermée du maillage.

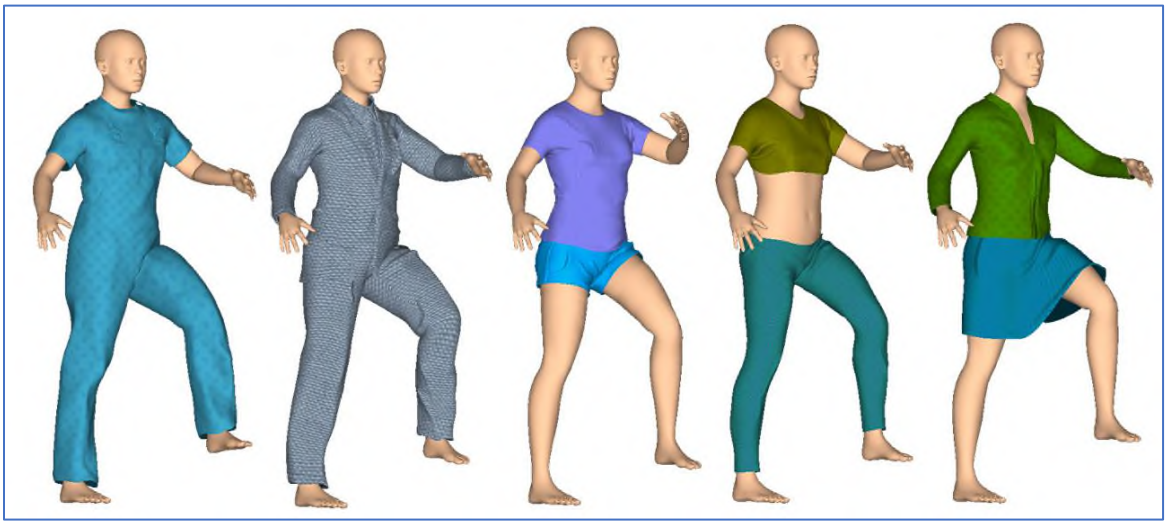


Figure 3-9 : Positionnement de différents types de vêtements sur un même corps

- **Habillage d'un corps en différentes postures**

Le système de positionnement que nous avons proposé permet d'habiller facilement un même corps sous différentes postures avec un même modèle de vêtements. Nous avons choisi six poses d'un modèle masculin de l'ensemble de données SMPL [98], et deux modèles de vêtements de la base de données Multi-garment Network [19]. Les modèles de vêtements sont transformés individuellement depuis une pose T vers les autres poses du corps (figure 3.10).

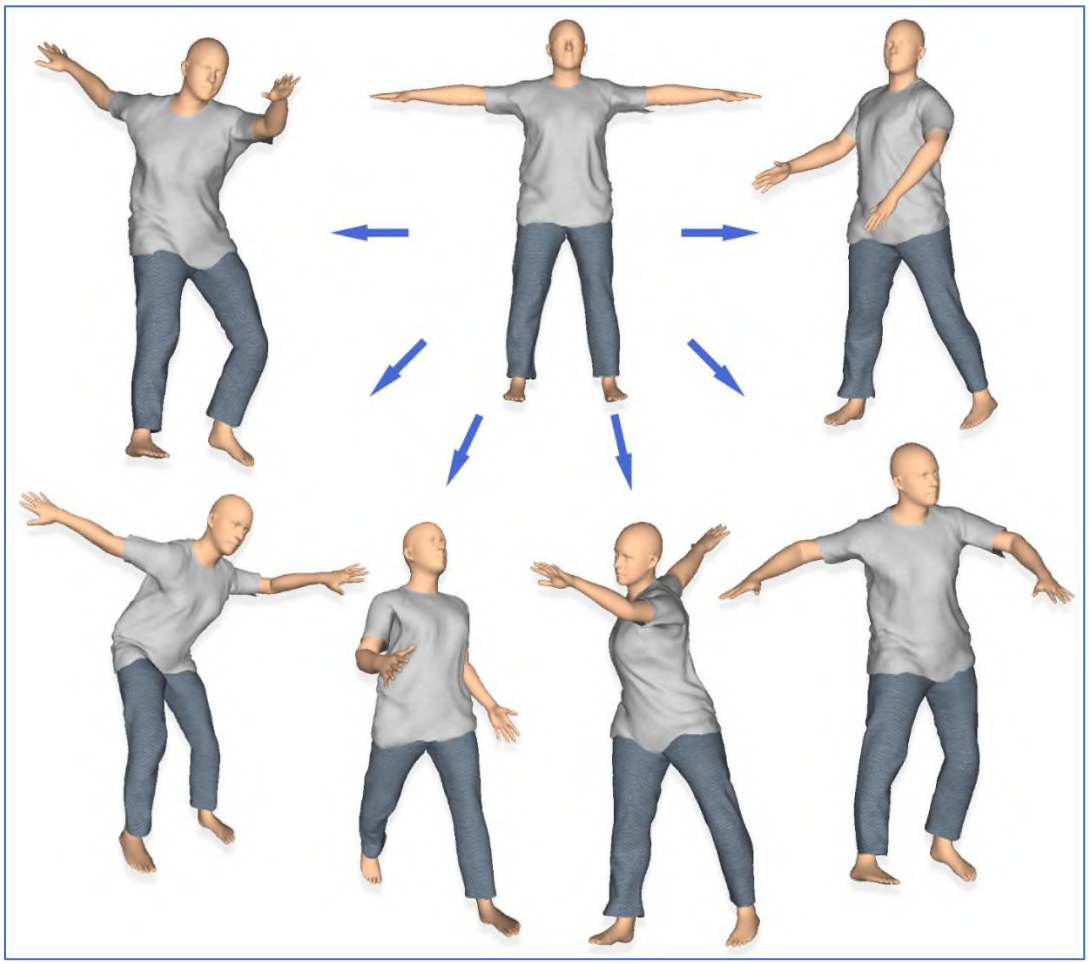


Figure 3-10 : Positionnement de vêtements sur un même corps en différentes postures

Comme le montre la figure 3.10, nous pouvons remarquer que la géométrie du vêtement transféré suit la posture et la forme du corps. Par conséquent, le système de positionnement basé sur la déformation HRBF permet de positionner un même vêtement à plusieurs reprises sur un corps en animation. De plus, la simulation préserve l'aspect intrinsèque des vêtements déformés qui reflète l'élasticité du vêtement.

Nous pouvons noter aussi que dans la simulation présentée sur la figure 3.10, les vêtements très serrés nécessitent un alignement précis de leurs squelettes avec celui du corps. Par exemple, dans le modèle de pantalon, toute déviation d'une articulation du genou pourrait provoquer trop de pénétrations entre les deux modèles. Par conséquent, tant que les squelettes des deux modèles se coïncident, les pénétrations sont facilement éliminées.

- **Différentes résolutions du vêtement**

La figure 3.11 présente les résultats de positionnement d'un même vêtement simulé en différentes résolutions sur un modèle humain.

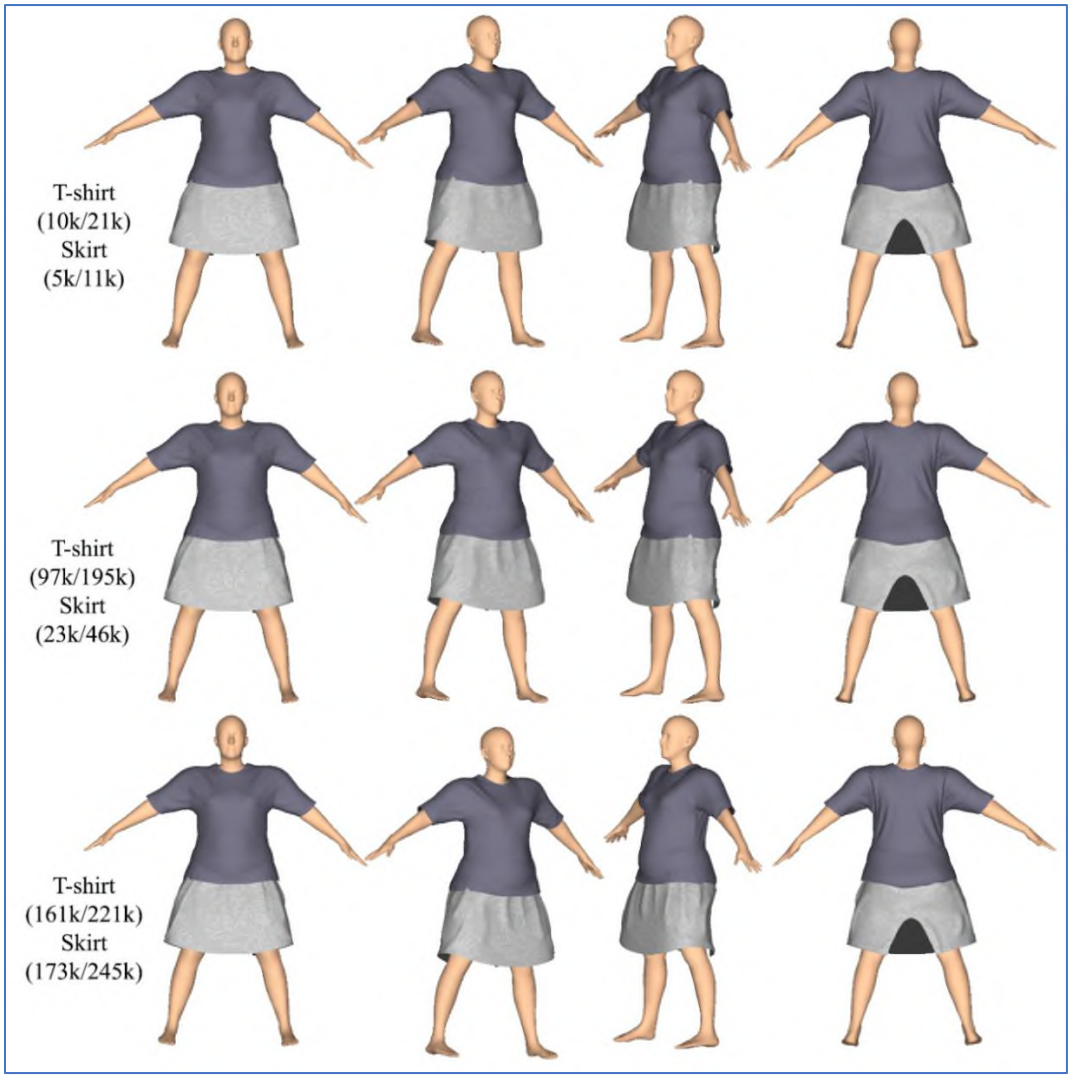


Figure 3-11 : Résultats de positionnement de deux modèles de vêtements ayant des résolutions différentes sur un même corps

D'après les résultats de cette simulation, le modèle à haute résolution apparaît plus naturel, ce qui est parfaitement visible aux extrémités inférieures de la jupe. Le résultat du modèle à basse résolution montre seulement un léger manque de détails sur la surface de vêtement. Nous pouvons noter que pour les vêtements à haute résolution, il est possible de simplifier la résolution d'une manière appropriée afin de réduire le temps d'exécution du processus de positionnement.

- **Habillage du corps humain scanné**

Afin de montrer l'efficacité des résultats de la méthode du positionnement en utilisant des caractères scannés, nous l'avons testé sur trois modèles de corps scannés issus de la base de données SCAPE [9]. Sur la figure 3.12, nous montrons le résultat du positionnement d'un modèle de t-shirt sur les trois corps scannés.

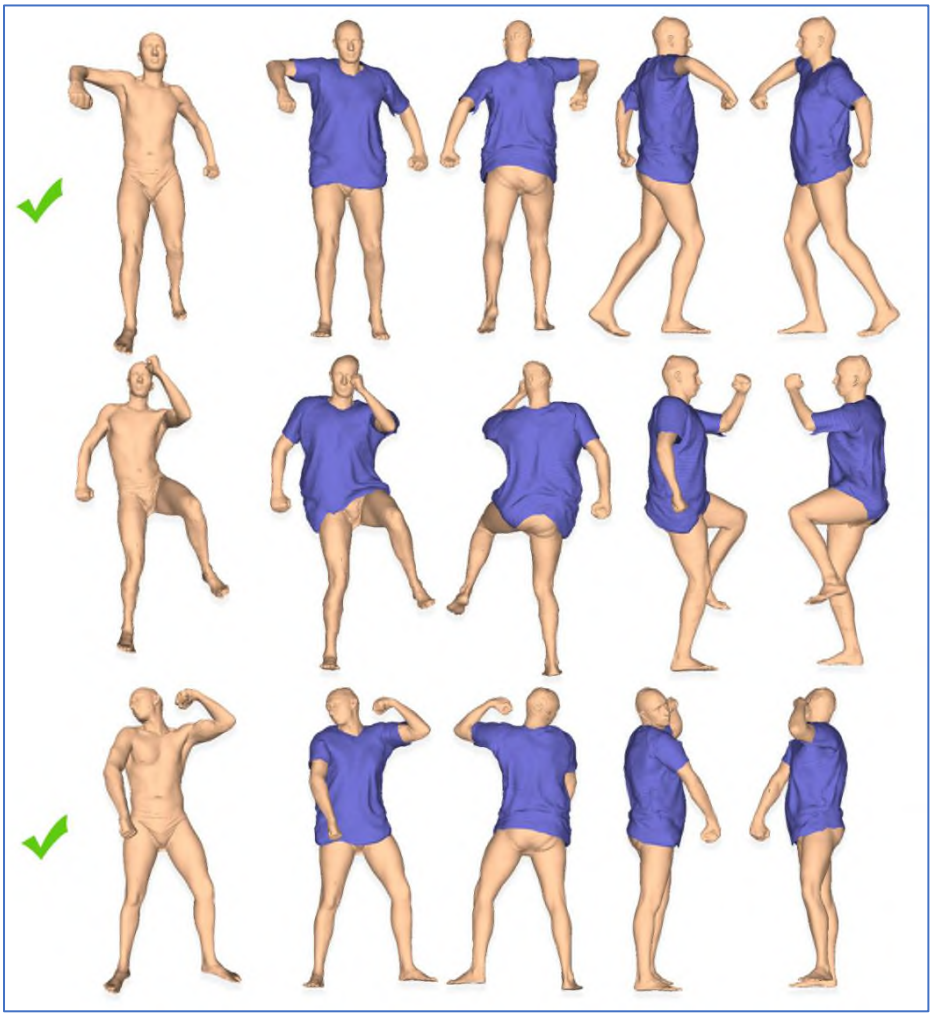


Figure 3-12 : Résultats de l'ajustement d'un modèle de t-shirt sur trois corps humains scannés différents issus de [9]

Comme nous remarquons, le système de positionnement a réussi à positionner le vêtement sur les corps de la première et la troisième ligne. Ces résultats sont dus à la structure des modèles du corps scannés, et à la complexité de leurs postures.

- **Transférer des vêtements de tailles différentes sur un même corps**

La figure 3.13 présente les résultats du transfert d'un modèle de chemise sous différentes échelles de taille sur un même modèle de corps dans une pose T. D'après les résultats visuels, le troisième modèle semble être le mieux adapté au corps.

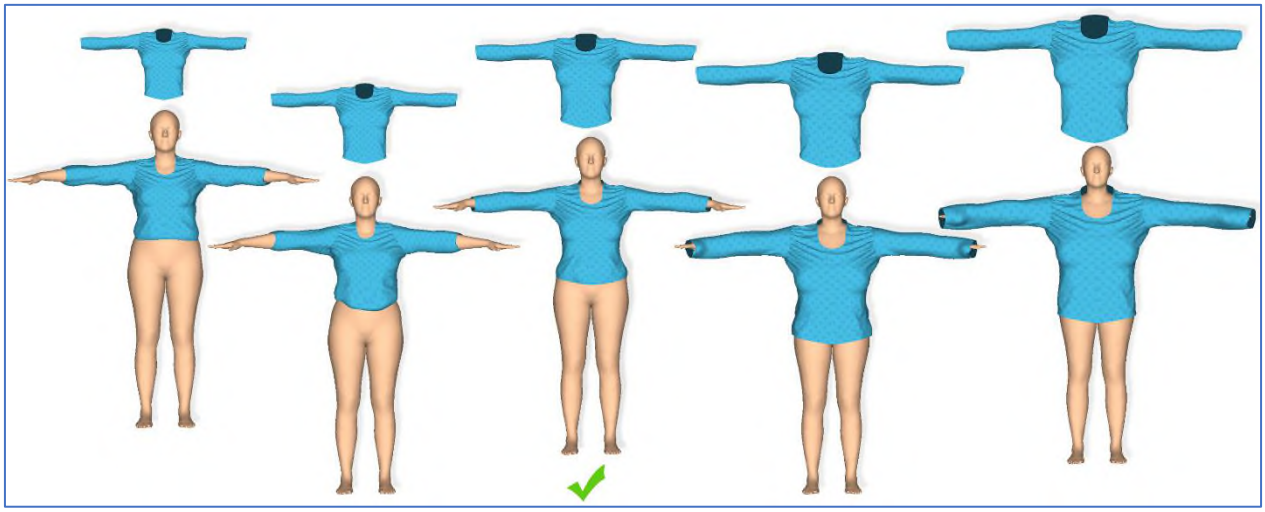


Figure 3-13 : Résultats du transfert de quatre modèles de chemises ayant une taille différente sur un même corps

3.6.2. Comparaison avec les approches alternatives

- **Comparaison avec les méthodes d'ajustement récentes**

Nous avons effectué une comparaison de la méthode positionnement proposée avec les travaux connexes récemment publiés. Cette comparaison présentée dans les tableaux 3.1 et 3.2, a été mené suivant six critères :

1. Les exigences d'entrée du système ;
2. La déformation de vêtements ;
3. Les postures de corps supportées ;
4. Les types de vêtements pris en charge ;
5. La gestion des pénétrations entre les modèles ;
6. La préservation des caractéristiques du maillage de vêtements.

Approches	Données d'entrée	Postures du corps	Types du vêtement
Li et al. 2010 [93]	– Modèle du vêtement. – Modèle du corps cible.	Différentes postures	Vêtements avec des surfaces à forme fermée
Li et al. 2013 [92]	– Modèle humain de référence portant le modèle de vêtements. – Modèle humain cible.	Différentes postures	Vêtements avec des surfaces à forme fermée
Pons-Moll et al. 2017 [113]	– Modèle humain de référence portant un vêtement (à partir d'un scanner 4D). – Modèle humain cible.	La pose du corps cible en cohérence avec la pose du corps de référence.	Vêtements avec des surfaces à forme fermée
Tisserand et al. 2017 [137]	– Modèle de vêtements. – Modèle du corps cible.	T-pose	Vêtements avec des surfaces à forme fermée
Wu et al. 2018 [146]	– Modèle de vêtements. – Modèle du corps cible.	Différentes postures	Différents types
Jiang et al. 2019 [69]	– Modèle humain de référence portant le modèle de vêtements. – Modèle humain cible.	Différentes postures	Différents types
Shi et al. 2020 [128]	– Image complète du corps habillé. – Modèles de vêtements 3D. – Modèle humain cible.	Différentes postures	Différents types
Notre méthode	– Modèle de vêtements. – Modèle du corps cible.	Différentes postures	Vêtements avec des surfaces à forme fermée

Tableau 3-1 : Comparaison avec des méthodes alternatives au niveau de données d'entrée ; posture du corps et type de vêtement

Le système que nous avons proposé nécessite des modèles d'entrée qui sont faciles à trouver. Cependant, d'autres méthodes d'ajustement de vêtements [157, 137, 146, 113] nécessitent en plus un modèle humain de référence. La plupart des approches présentées dans ce tableau, à l'exception de [69], s'intéressent à la facilité de manipulation du processus d'adaptation, plutôt qu'à la préservation des caractéristiques du vêtement.

Approches	**Déformation de vêtements**	**Gestion des pénétrations**	**Préservation des caractéristiques**
Li et al. 2010 [93]	Paramétrage volumétrique	Manquant	Non assurée
Li et al. 2013 [92]	Paramétrage volumétrique	Manquant	Non assurée
Pons-Moll et al. 2017 [113]	Dépouillé au modèle humain	Manquant	Non assurée
Tisserand et al. 2017 [137]	Dépouillé au modèle humain	Manquant	Non assurée
Wu et al. 2018 [146]	Dépouillé au modèle humain	Utilise des algorithmes de gestion des collisions	Non assurée
Jiang et al. 2019 [69]	Manquant	Les collisions vêtement/ vêtement et corps/ vêtement sont toutes les deux traitées.	Assurée
Shi et al. 2020 [128]	Manquant	Manquant	Non assurée
Notre méthode	Déformé par squelette avec le suivi des sommets par l'approximation HRBF	Les collisions vêtement/ vêtement sont traitées à l'aide de l'étape de suivi HRBF, et les collisions corps/vêtement sont traitées à l'aide du processus de gestion des pénétrations (paragraphe 3.5.2).	Assurée

Tableau 3-2 : Comparaison avec des méthodes alternatives au niveau de déformation, gestion des pénétrations et préservation de caractéristiques du vêtement

Bien que notre méthode soit distinguée par l'étape de déformation du vêtement, elle est similaire avec les autres méthodes de positionnement dans l'étape de transfert du vêtement. Nous avons effectué une comparaison avec des méthodes alternatives [128, 137, 146] au niveau de la complexité de l'étape de transfert.

La méthode proposée par Tisserand et al. [137] effectue une étape d'optimisation globale afin de minimiser la métrique d'erreur dans l'étape de transfert du vêtement. La complexité de cette optimisation est $O\left(k.N_h.N_g\right)$, où N_h le nombre de sommets du modèle humain, N_g le nombre de sommets du vêtement et k est le nombre d'itérations de l'optimisation. Wu et al. [146] ont proposé une étape d'optimisation plus rapide avec une complexité de $O\left(k.N_g\right)$. Shi et al. [128] proposent un ajustement du vêtement basé sur la déformation par squelette avec une complexité de $O\left(N_h.\log N_h\right)$. En revanche, notre méthode ne nécessite aucune étape d'optimisation. En effet dans le cas de la déformation basée sur l'approximation HRBF, la complexité de l'étape de transfert du vêtement vers le corps est $O\left(N_g.\log N_h\right)$. Dans la plupart des cas, le nombre de sommets du maillage du vêtement est inférieur à celui du maillage du corps ; par conséquent, le transfert du vêtement permet d'économiser un temps de calcul important.

- **Comparaison avec les méthodes basées sur la déformation par squelette**

Bien que certaines approches récemment proposées [93, 92, 146, 128] présentent de nombreuses étapes détaillées, il leur manque toujours des détails de mise en œuvre spécifiques dans certaines étapes, ce qui rend la reproduction de leurs résultats difficile. Par conséquent, nous limitons cette comparaison aux étapes importantes et similaires avec les autres approches basées sur la déformation par squelette [93, 146]. La méthode de positionnement que nous avons proposée diffère de ces méthodes en termes d'étape de suivi de la déformation par l'approximation HRBF. Dans le cas de la proposition de [93], les auteurs utilisent un maillage tétraédrique pour déformer le modèle de tissu. Cette approche présente un problème pour le cas où deux parties différentes du maillage du vêtement sont proches en distance géométrique, et éloignées en distance géodésique. En effet, des déformations irréalistes peuvent se produire dans ce cas, par exemple, dans la région de l'aisselle (figure 3.14 (a)). En revanche, notre méthode permet de surmonter ce type de problème à l'aide de l'approximation HRBF du maillage (figure 3.14 (b)).

Le travail de Wu et al. [146] utilise la méthode de Baran et al. [16] pour générer le squelette et les poids de dépouillement. Cependant, cela nécessite que le modèle d'entrée soit un *"manifold"*, et de nombreuses interventions de l'utilisateur sont indispensables. En revanche, le système d'incorporation de squelette proposé a prouvé son succès dans la plupart des cas, sauf pour certains maillages complexes qui nécessitent une manipulation manuelle.

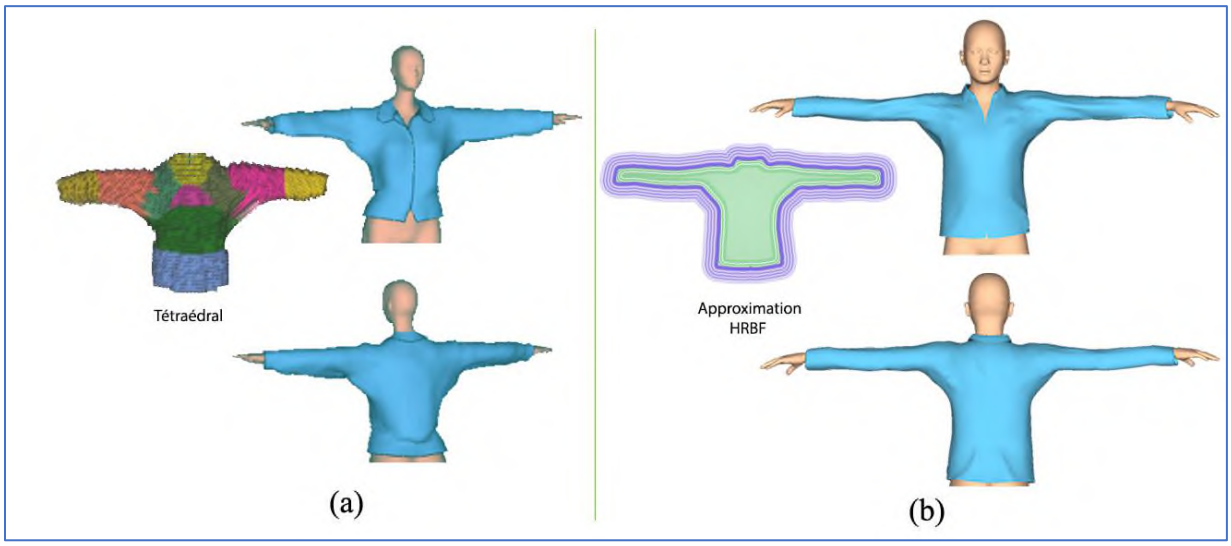


Figure 3-14 : Comparaison des résultats de la déformation du vêtement en utilisant le tétraédral de proposition de [93] (a) ; et l'approximation HRBF (b)

- **Comparaison avec les méthodes basée sur l'enrobage (skinning).**

Bien que notre approche entre dans la catégorie des approches qui utilisent l'enrobage DQS pour déformer le maillage du vêtement, elle se distingue par l'utilisation de l'étape de correction des positions des sommets effectuée après une déformation standard. Cela permet d'éviter deux problèmes majeurs causés par le dépouillement standard, à savoir : l'auto-pénétration du vêtement et la déformation élastique extrême. Nous avons effectué la comparaison avec la méthode de Guan et al [55]. Comme le montre la figure 3.15, la transformation du corps amène le vêtement transformé dans un état fortement déformé. Cela pose un problème, car il n'est pas facile de résoudre les problèmes d'auto collisions dans ce cas.

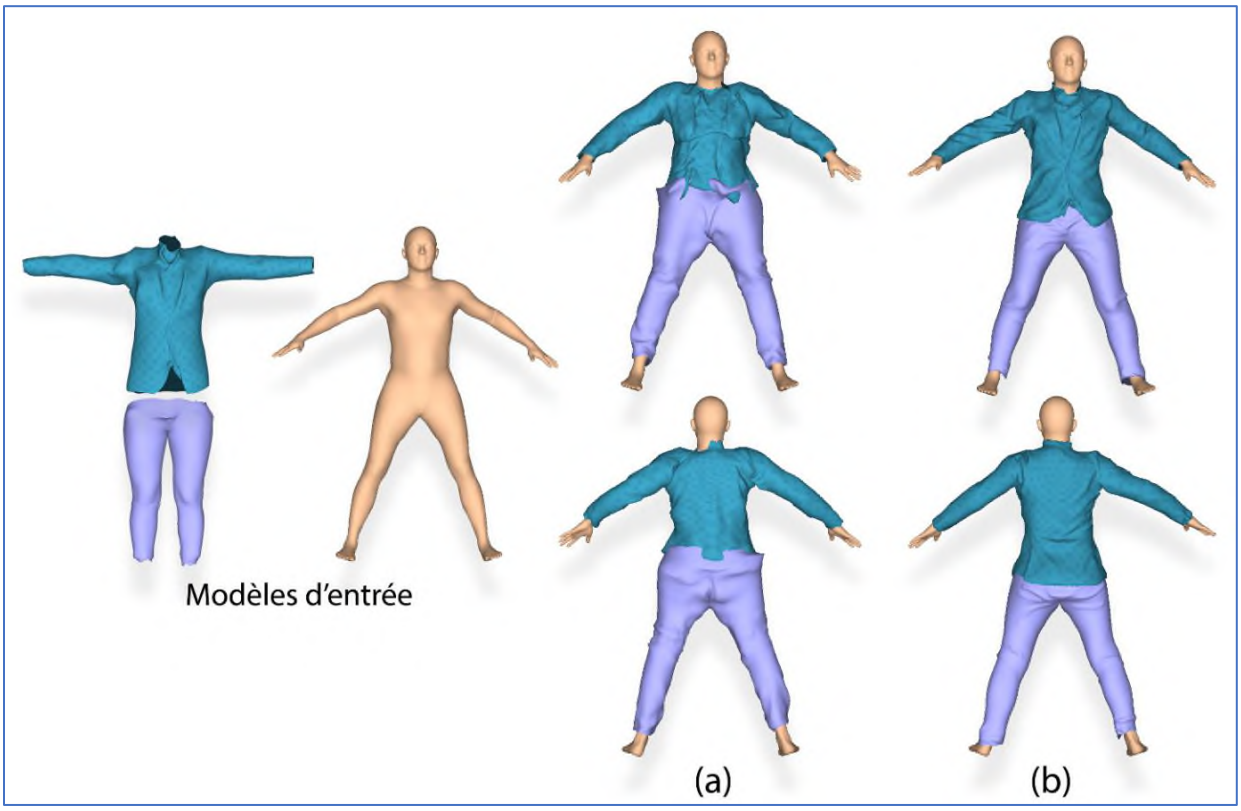


Figure 3-15 : Comparaison en termes de traitement des auto collisions entre la méthode standard basée sur l'enrobage [55] (a) et nos résultats (b)

3.7. Performances d'exécution

Nos simulations ont été réalisées sur un PC équipé d'un processeur Intel i7-4720HQ à 2,60 GHz, avec 16 Go de RAM et une carte graphique Geforce 480 GTX. Le tableau 3.3 présente les statistiques de temps d'exécution pour certains exemples. Pour chaque modèle, les statistiques présentées dans ce tableau sont classées comme suit :

1. Nombre de sommets et de faces du vêtement ;
2. Nombre de sommets et de faces du corps ;
3. Le temps d'exécution de l'étape d'intégration de squelette pour le vêtement ;
4. Le temps d'exécution de la déformation du vêtement ;
5. Le temps d'exécution de calibrage, qui concerne le changement des dimensions du vêtement si nécessaire ;
6. Le temps d'exécution des étapes de transfert du vêtement vers le corps.

Comme nous pouvons constater, l'étape de l'intégration du squelette et l'étape de transfert du vêtement qui inclut le traitement des pénétrations, sont généralement les étapes qui nécessitent

plus de temps de calcul. Afin d'optimiser le coût de l'étape de traitement des pénétrations, nous utilisons le résolveur de démêlage proposé par Ye el al. [152] pour les pénétrations initiales et les collisions éventuelles entre le tissu et le corps après la déformation du vêtement.

Modèle	Vêtement (sommets/faces)	Corps (sommets/faces)	Intégration du squelette (s)	Déformation (s)	Calibrage (s)	Transfert du vêtement (s)	Total (s)
Chemise (Figure 3.7 1er ligne)	5148/10096	13380/26756	5.357	0.850	0.090	2.321	8.61
Pantalon (Figure 3.7 1er ligne)	3485/6848	13380/26756	4.421	0.641	0.130	5.019	10.21
T-shirt (Figure 3.9)	1311/2514	11452/19254	3.273	0.332	0.115	4.012	7.73
Pantalon (Figure 3.10)	9998/19849	6890/13776	4.984	1.418	Non effectué	3.207	9.60
Jupe (Figure 3.11 2eme ligne)	23544/46592	6890/13776	4.114	3.160	Non effectué	12.661	19.93
Chemise (Figure 3.12 1er ligne)	7702/15180	12500/24999	5.625	0.713	Non effectué	9.124	15.46

Tableau 3-3 : statistiques de temps d'exécution (en seconde) pour certaines simulations présentées dans le présent chapitre

Le traitement de la pénétration est lié généralement au nombre de sommets du vêtement qui pénètrent le corps humain. Par exemple, la pénétration pour un modèle de pantalon sur la figure 3.10 prend moins de temps de calcul que le cas du pantalon sur la figure 3.7. Ceci est dû au fait qu'une forme du maillage plus large permet relativement d'éviter trop de pénétration. Dans le cas de modèle sur la figure 3.12, la manipulation des pénétrations prend plus de temps à cause de la forme du modèle humain scanné qui peut générer plus de collisions avec le vêtement.

Nous pouvons noter que le temps de calcul de la déformation du vêtement est indépendant de la posture du modèle humain ; en effet, le temps que nécessite la déformation des modèles présentés sur la figure 3.11, est proportionnellement le même pour toutes les poses du corps. Pratiquement,

le temps d'exécution de la déformation du vêtement est principalement lié à l'étape d'approximation HRBF. La forme du vêtement et le nombre d'os utilisés dans l'étape de partitionnement sont les principaux facteurs affectant la création des champs potentiels HRBF. Nous avons utilisé le parallélisme GPU afin d'optimiser les étapes de déformation du vêtement (chapitre 2), à savoir, le déploiement en DQS, la projection des sommets, la relaxation tangentielle.

3.8. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté une méthode pratique pour positionner un vêtement donné sur un modèle humain 3D ayant diverses postures et formes sans utiliser un modèle humain de référence. Ce système de positionnement établit la correspondance entre les modèles humains et les modèles de vêtements sans informations prédéfinies. L'idée de base est d'utiliser la déformation par squelette pour assurer un bon alignement entre le vêtement et le corps cible par l'habillage. En se basant sur la différence structurelle entre le squelette du corps et le squelette du vêtement, nous ajustons la posture du vêtement avec celle du corps, ce processus est effectué en utilisant la méthode de déformation basée sur les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF). Après la déformation du vêtement, il est possible de le positionner automatiquement autour du corps humain. Ensuite, nous effectuons un traitement des collisions sur le modèle résultant afin de résoudre les interpénétrations potentielles entre le corps et le vêtement. Selon les résultats présentés dans le présent chapitre, notre approche génère des résultats plausibles et son application dans les logiciels de modélisation est très possible.

Chapitre 4

Nouvelle méthode de déformation à base des formes volumétriques (DBVS) - Application au maillage de main virtuelle

4.1. Introduction

Le besoin du personnage virtuel animé est devenu important dans les scènes virtuelles telles que les jeux vidéo ou les productions de film d'animation. Il est fréquent d'avoir besoin de définir des personnages plausibles, dont l'animation obéit aux aspects d'une déformation réelle. Un corps humain virtuel est principalement constitué de diverses parties, qui se distinguent par leur difficulté de manipulation. La main virtuelle est parmi les membres difficiles à manipuler lors de l'animation. Généralement, la simulation d'une main virtuelle dans les productions graphiques, essaye d'imiter la structure de la main réelle, qui est un chef-d'œuvre de complexité mécanique. Concevoir un modèle 3D de la main humaine, qui reflète la dynamique d'une main réelle, nécessite beaucoup de détails anatomiques. Il est donc nécessaire d'effectuer la déformation d'un tel modèle de main virtuelle par des méthodes de déformation procédurale, qui soient à la fois plausibles, contrôlable, et suffisamment rapide.

En mécanique, la déformation est exprimée comme la réponse d'un objet aux forces auxquelles il est soumis. Ainsi, l'évolution spatiale et temporelle de la forme s'exprime comme une solution intégrée à une équation à dérivées partielles. L'intégration de ces équations est désignée par simulation physique [86]. Cependant, il est généralement difficile de contrôler le résultat final de cette simulation. Il existe plusieurs méthodes alternatives aux méthodes physiques, pour déformer des objets 3D [49] ou des tissus virtuels [1], de manière simple et contrôlable.

L'enrobage (*skinning*) est l'une des approches les plus utilisées dans le milieu professionnel pour la déformation et l'animation d'objets attachés à un squelette (chapitre 1 paragraphe 1.4.3). Elle permet à la fois de manipuler intuitivement le squelette et d'assurer en quelque sorte un calcul rapide. Cependant, ce type de méthode présente un problème majeur : une déformation irréaliste due à une remarquable perte de volume local lors de l'application d'une rotation importante des

articulations. Les artistes sont ainsi obligés de mettre en place des outils alternatifs pour surmonter cette perte de volume. Ils doivent aussi avoir une expertise technique afin de déterminer si la perte est due principalement à la méthode, ou si celle-ci peut être évitée par une manipulation simple des poids d'enrobage.

Dans la déformation par squelette, la surface du maillage est attachée à un ensemble d'os interconnectés [101]. En transformant le squelette en différentes poses, l'utilisateur est capable de déformer un maillage intuitivement. Chaque sommet du maillage est associé à un ou plusieurs os, selon les poids d'influence définis auparavant. Les méthodes standard comme l'enrobage par fusion linéaire (LBS) [55] et l'enrobage en *"Dual quaternion"* (DQS) [75], combinent des transformations osseuses rigides pour mettre à jour la position des sommets. Ainsi, les positions des sommets sont indépendantes les unes des autres. Bien que ce principe d'indépendance permet une implémentation temps réel de ces algorithmes, la forme globale de l'objet peut être affectée. Ce qui entraîne ensuite des déformations irréalistes. De nombreuses solutions ont été proposées impliquant différentes stratégies d'interpolation et représentations du maillage [138].

Dans le présent chapitre, nous allons présenter notre troisième contribution dans le contexte d'animation des caractères articulés associés à un squelette. Nous avons choisi le cas d'une main virtuelle avec squelette. Cette contribution a pour objectif de surmonter les défauts de l'enrobage standard (LBS et DQS), en ajoutant une étape de post-traitement qui consiste à corriger les positions des sommets du maillage déformé. La correction des positions est effectuée à l'aide de formes volumétriques qui sont considérées comme guides de déformation des articulations.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit : le paragraphe 4.2 expose le principe de calcul du poids d'enrobage utilisé dans la méthode proposée. Dans le paragraphe 4.3, nous présentons un aperçu général de la méthode de DBVS. Le paragraphe 4.4 expose les différentes étapes de la déformation du maillage à l'aide des formes volumétriques. Dans le paragraphe 4.5, nous présentons les résultats d'application de DBVS sur un maillage de main humaine. Le paragraphe 4.6 présente les performances en temps d'exécution de la méthode DBVS. Dans le paragraphe 4.7 nous montrons les possibilités du contrôle utilisateur de la déformation DBVS. Le paragraphe 4.8 présente les résultats de comparaisons avec certaines méthodes de déformation alternatives.

4.2. Calcul du poids d'enrobage

La déformation par enrobage classique demande trois données d'entrée : un maillage représentant l'objet, une structure qui représente le squelette d'animation, et les poids d'enrobage représentant l'influence des transformations des os du squelette par rapport aux positions des sommets du maillage.

Généralement, les maillages d'entrée sont construits par un artiste ou issus de données numérisées par des scanners 3D dans le cas d'objets réels. Quant au squelette d'animation, il est aisément modélisable en utilisant des outils professionnels de modélisation 3D tels que Blender [20], 3DS Max [7]. Dans le cas d'une main virtuelle, des méthodes automatiques de génération de squelettes similaires à la structure d'un squelette anatomique peuvent être employées comme dans la proposition de [12]. Enfin, la définition des poids d'enrobage demande une expertise plus particulière, par ce que leur manipulation est moins intuitive. Les méthodes classiques utilisées pour définir des poids (chapitre 1 paragraphe 1.4.3) montrent qu'il n'existe pas de méthodes fiables qui permettent une définition de manière automatique, et qui soient rapides et applicables pour toute forme de modèle.

Quoique les outils de type pinceaux disponibles dans les logiciels de modélisation permettent à l'artiste d'apporter manuellement les corrections de poids indispensables, nous pensons qu'une correction automatique adéquate de poids d'enrobage en tant que post-traitement permet d'éviter ce travail manuel fastidieux.

4.3. Principe général de la méthode DBVS

Dans ce paragraphe, nous présentons une nouvelle méthode implicite pour déformer la main virtuelle en utilisant des formes volumétriques générées avec des primitives sphériques. La nouvelle méthode de déformation basée sur des formes volumétriques (*DBVS : deformation based on volumetric shapes*) est utilisée comme étape de post-traitement après une déformation standard (avec LBS ou DQS). Son principe consiste à enregistrer la distance initiale des sommets du maillage par rapport à une forme volumétrique, puis de ramener les sommets à leurs positions initiales, ceci après avoir appliqué la transformation (LBS ou DQS) nécessaire en parallèle sur le maillage de l'objet et la forme volumétrique.

Comme étape de correction de la déformation, la méthode de déformation à base de formes volumétriques peut être intégré facilement dans le pipeline des outils de déformation professionnelle. Nous pouvons résumer les principales contributions de cette proposition comme suit :

- **Qualité de la déformation**. La distance des sommets par rapport à la forme volumétrique est considérée comme une contrainte qui permet d'empêcher la perte de volume local au niveau d'articulation ainsi que l'effet d'emballage de bonbons causé par la méthode LBS. Elle réduit également l'artefact d'auto-intersections causé par la méthode DQS.

- **Compatibilité descendante**. Les données d'entrée requises sont similaires aux autres méthodes d'enrobage par squelette : une pose initiale du maillage, définition des poids d'enrobage et la transformation appliquée au squelette.

- **Performance.** Comme nous allons le voir par la suite, la méthode proposée est facile à implémenter et les résultats de simulation sont satisfaisants. En plus, la correction automatique des surfaces de contact au niveau des articulations (sans avoir recours à la gestion de collision) réduit le coût de simulation en temps d'exécution et en mémoire.

Un aperçu général de la méthode de DBVS est illustré sur la figure 4.1. Nous utilisons comme données d'entrée un maillage de main associé à un squelette d'animation. Puis, nous définissons l'influence des poids associés à chaque os du squelette à l'aide de l'outil de pondération du logiciel Blender [20]. Ensuite, nous segmentons le maillage de la main en morceaux suivant la distribution d'influence de chaque os du squelette sur le maillage.

Notre idée de base est d'ajuster les positions des sommets calculés à l'aide des méthodes d'enrobage standard. Pour bien suivre les déformations du maillage de la main, nous définissons des primitives sphériques associées aux articulations. À partir de ces primitives, nous construisons un modèle volumétrique en utilisant l'algorithme d'approximation proposé par Thiery et al. [135].

Au fur et à mesure de la segmentation du maillage, nous générons un modèle volumétrique par morceaux M_e. En utilisant cette configuration, chaque sommet du maillage stocke sa distance

initiale $d_{init}(v)$ par rapport à M_e. Cette distance est calculée à l'aide de fonctions de distance signée. Ensuite, les valeurs de cette distance sont reparamétrées pour approcher chaque partie du maillage manuel avec l'iso-surface 0.5 d'un champ potentiel $g:\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$. Cela nous permet d'encoder les détails du maillage autour de l'iso-surface 0.5 du champ de potentiel g. Ensuite, nous définissons une seule fonction potentielle g en utilisant un opérateur de mélange basé sur le gradient comme dans la proposition de [54]. L'iso-surface 0.5 de g permet la correction de la déformation de la peau lors de l'animation.

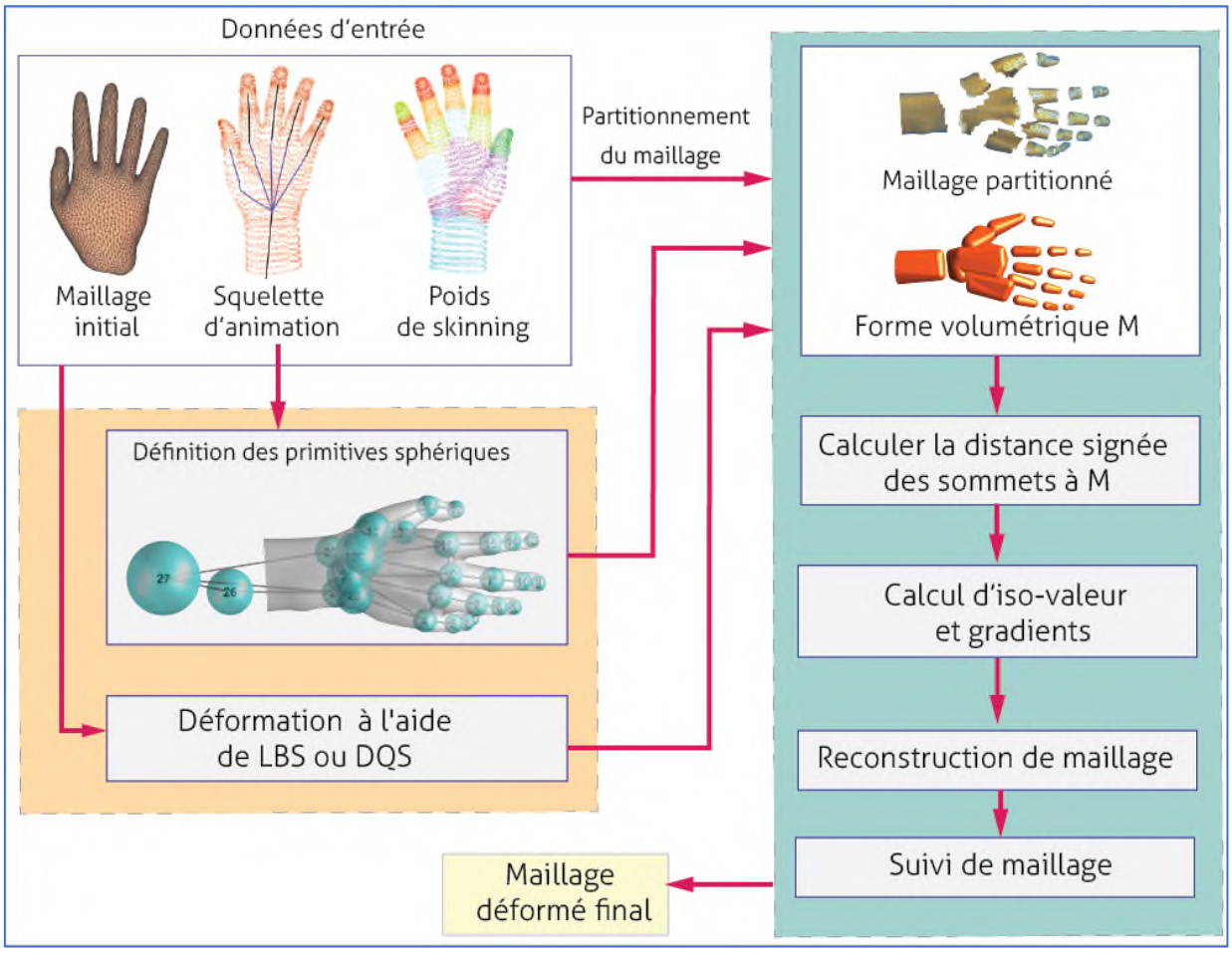


Figure 4-1 : Principe général de la méthode de déformation basée sur des formes volumétriques

Nous appliquons simultanément une transformation avec la méthode de DQS sur le maillage de la main et sur les parties du modèle volumétrique M_e. Plus précisément, nous appliquons la

même transformation d'un os sur sa partie associé dans M_e. À la fin, le suivi des positions des sommets est effectué après la transformation pour corriger les distorsions.

4.4. Déformation du maillage

La déformation avec la méthode DBVS est basée sur le fait que chaque sommet est déplacé pour atteindre sa distance d'origine par rapport à la forme volumétrique. Par conséquent, nous avons besoin d'un moyen efficace pour déterminer cette distance.

4.4.1. Création de la forme volumétrique

Pour approcher correctement les morceaux du maillage de la main, une forme volumétrique sera le bon choix. Le modèle que nous proposons dans cette approche est une variante d'une surface de convolution. Les éléments de base de ce modèle sont illustrés sur la figure 4.2. La surface est définie comme le niveau zéro de la fonction scalaire suivante :

$$\phi(x) = \min_{c \in E} H\left(x \middle| c, r(c)\right) \quad (4.1)$$

où E est le squelette de contrôle pour générer la forme volumétrique (figure 4.2), et H est la fonction implicite pour générer une sphère de centre c et de rayon r tel que :

$$H\left(x \middle| c, r(c)\right) = \|x - c\|^2 - r(c)^2 \quad (4.2)$$

Les centres des sphères recouvrent le squelette E, tandis que les rayons sont en fonction de la position du centre c, interpolée linéairement à partir des valeurs $r_e = r(c_e)$. L'équation 4.1 définit un modèle hybride, c'est une surface implicite, tandis que le squelette est une représentation explicite (c'est-à-dire un complexe simplicial).

Nous généralisons cette construction pour concevoir un modèle approprié pour représenter le maillage d'une main humaine. Le modèle est composé de deux primitives : nous appelons la première primitive une bi-sphère, qui est une coquille convexe de deux sphères. Cela peut être vu comme deux sphères séparées reliées par un cône tronqué. La seconde primitive est nécessaire pour représenter les parties planes de la main ; on l'appelle un tri-sphère, qui est une coquille convexe définie par trois sphères.

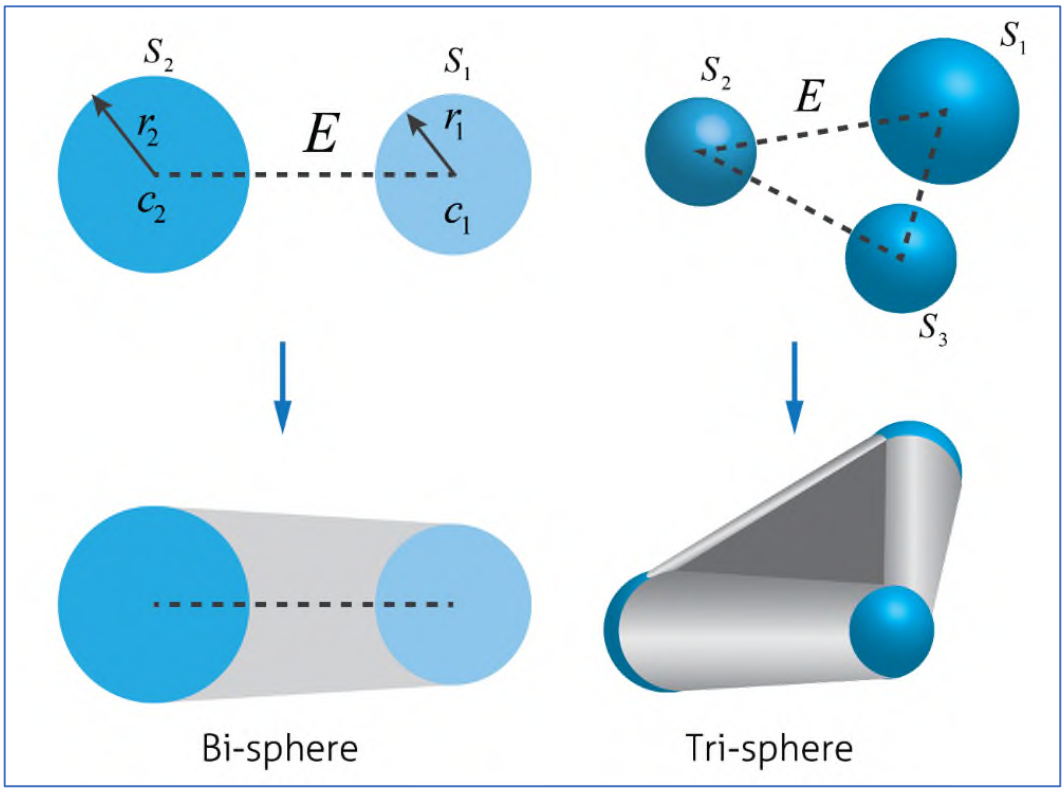


Figure 4-2 : Principe de construction des parties de la forme volumétrique

Notre algorithme exploite la structure de l'équation 4.1, en décomposant la surface en n éléments. Comme illustré sur la figure 4.2, les éléments sont classés comme primitives implicites sous forme de bi-sphère et tri-sphère, avec des fonctions implicites associées ϕ_e. Ainsi, pour un sommet v dans l'espace, la fonction implicite de la surface entière peut être définie par :

$$\phi_e(v) = \arg\min_{i=1..n} \phi_i(v) \quad (4.3)$$

La distance du sommet v par rapport à M_e est facilement calculée en interrogeant les distances aux éléments linéaires par morceaux du squelette E. Comme illustré sur la figure 4.3 (a), la distance d'un sommet v par rapport à sa partie du modèle associé est déterminée en recherchant le point le plus proche q du modèle par rapport au sommet v. Nous recherchons q dans le cas des modèles à deux et trois sphères comme illustrées sur la figure 4.3 (b).

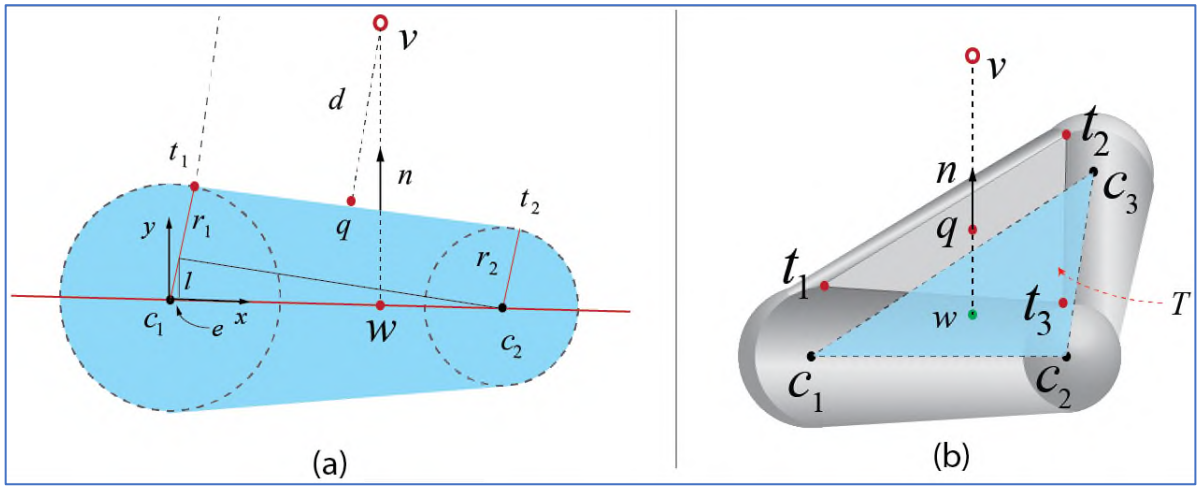


Figure 4-3 : Principe de calcul de la distance d'un sommet v par rapport à la forme volumétrique

4.4.1.1. Distance du sommet par rapport à une forme bi-sphère

Une forme bi-sphère est définie par deux sphères $S_1(c_1, r_1)$ et $S_2(c_2, r_2)$ (figure 4.3 (a)). Par construction, q est situé sur le plan défini par le triplet $\{c_1, c_2, v\}$ qui permet de résoudre le problème de correspondance en 2D. Nous avons défini le point w comme l'intersection du rayon (qui passe par v) avec le segment $[c_1 c_2]$. La position en coordonnées barycentriques de w est donnée par :

$$w = \beta c_1 + (1+\beta) c_2 \qquad (4.4)$$

Si $\beta \in [0,1]$, la position du point le plus proche est donnée par l'intersection de $[c_1 c_2]$ et r tel que $q = \Pi_L(v)$.

La distance d du sommet v par rapport à M est calculée à l'aide des dérivations suivantes, qui sont principalement des relations géométriques basées sur l'illustration sur la figure 4.3 ci-dessus

$$d(v) = \|v - w\| + \theta \|v - w\| \qquad (4.5)$$

avec $\theta = \dfrac{y}{\|c_2 - c_1\| - e}$, $y = \sqrt{(\|c_2 - c_1\| - e)e}$ et $e = \dfrac{(r_1 - r_2)^2}{\|c_2 - c_1\|}$.

Si $\beta < 0$ ou $\beta > 1$, alors le point le plus proche sera la projection de v sur S_1 ou S_2 respectivement, c'est-à-dire $q = \Pi_{S_1}(v)$ ou $q = \Pi_{S_2}(v)$. Dans ce cas, les formules sphériques peuvent être utilisées pour calculer la distance de v par rapport à M tel que :

$$d(v) = \|v - c\| - r \qquad (4.6)$$

4.4.1.2. Distance du sommet par rapport à une forme tri-sphère

Une tri-sphère est définie par trois sphères $S_i(c_i, r_i)$. La figure 4.3 (b) ci-dessus illustre la manière dont un élément plan peut être décomposé en trois parties : les éléments sphériques, coniques et planes associées aux sommets, des arêtes et des faces du modèle sphérique. Pour la partie plane $P(t_1, n)$ de normale n et la tangente t_1 par rapport à S_1, on calcule la projection oblique w en recherchant l'intersection du rayon r (qui passe par v) avec le triangle T formé par (c_1, c_2, c_3). En fonction de la position de w, nous avons deux solutions possibles :

- Si w appartient au triangle T, alors le point le plus proche sera la projection de v sur le plan P tel que : $q = P(v)$. Sinon, nous utilisons les coordonnées barycentriques de w dans le triangle T pour identifier le point le plus proche comme dans le cas de la bi-sphère. Encore une fois, nous pouvons utiliser les formules précédentes pour certains cas (équations 4.5 et 4.6).

- Si q est sur le triangle tangentiel, alors la distance et le gradient peuvent être calculés en utilisant la normale.

4.4.2. Support compact de la forme volumétrique

Bien que les fonctions de distance globale soient un moyen intuitif pour déterminer la distance entre deux points, elles présentent certains inconvénients en ce qui concerne la combinaison de plusieurs surfaces. Plus précisément, la localité n'est pas facilement définie. Un volume ne doit influencer que le voisinage proche et ne doit avoir aucun effet après une certaine distance. Par conséquent, nous avons besoin de fonctions avec un support compact, que nous appelons les fonctions de distance locales.

Les primitives à support compact sont souvent définies par la distance inverse par rapport à un point, segments, polygones, etc. (figure 4.4). Dans ce cas, la distance est égale à 1 au centre de la primitive et diminue progressivement jusqu'à ce qu'elle atteigne 0. La distance reste constante en dehors d'un rayon spécifié. Les primitives implicites à support compact sont conçues avec l'adoption des conventions suivantes :

- L'iso-surface $g(v)=0.5$ est la surface intéressante.
- Les valeurs $g(v)>0.5$ représentent l'intérieur de l'objet.
- Les valeurs $g(v)<0.5$ représentent l'extérieur de l'objet.

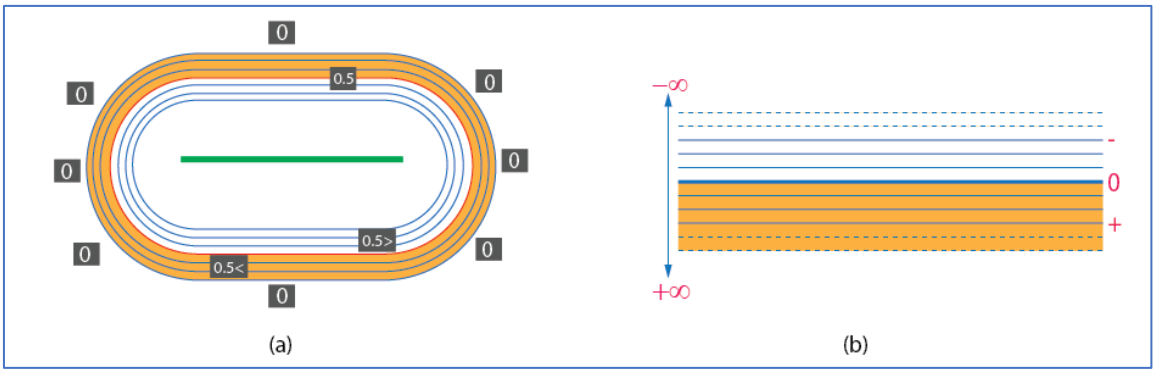


Figure 4-4 : Principe de support de surface implicite ; (a) primitive à support compact ; (b) primitive à support global

Pour concevoir le support compact adapté à la forme volumétrique, nous avons défini une nouvelle fonction $g(v)=t_R(d(v))$ telle que : $g(v)=1$ à l'intérieur et $g(v)=0$ à l'extérieur du maillage, avec une transition douce. La fonction g_r qui permet de fournir un support compact est définie par le re-paramétrage suivant :

$$t_R(d)=\begin{cases} 1 \quad si \quad d\le -R \\ 0 \quad si \quad d\ge R \\ I\left(\dfrac{d}{R}\right) \quad \text{sinon} \end{cases} \qquad (4.7)$$

avec $I(x)=-\frac{4}{16}x^5+\frac{5}{16}x^3-\frac{16}{15}x+1$ est une fonction d'interpolation et R est le seuil qui définit la taille du support compact de d.

Ceci convertit le support global d en une fonction potentielle g à support compact, tout en assurant la continuité au bord de son support. En pratique, nous voulons éviter des régions de l'espace où la valeur du potentiel est constante avec $g=1$ à l'intérieur de la surface. Une région avec des gradients nuls présentera un problème pour le déplacement des sommets (paragraphe 4.4.4). Pour cela, nous avons fixé R à le plus grand rayon des sphères utilisées dans la création du modèle volumétrique.

4.4.3. Composition des fonctions de distance

La principale force des surfaces implicites vient de leur simplicité pour être combinées ensemble dans une nouvelle forme. En effet, exprimer l'union, l'intersection ou la différence entre des surfaces implicites est extrêmement simple. La mise en œuvre d'une interface de modélisation booléenne devient facile avec cette représentation.

Par contre, il est connu que la combinaison de surfaces paramétriques (ou maillages) est sensiblement plus difficile à mettre en œuvre en raison des nombreux cas particuliers à gérer et des instabilités numériques. Dans la suite de ce paragraphe, nous décrivons le mécanisme de composition des parties de la forme volumétrique.

Une fois que les fonctions potentielles g sont calculées, nous les combinons pour définir un champ de potentiel G ajusté sur tout le maillage de la main afin de le déformer. Pour cela, nous appliquons une composition récursive en utilisant une composition par arbre CSG classique [Wyvill 1986]. Pour chaque paire de segments voisins (i, j), nous combinons les champs en un seul tel que : $G = k\left(g_i, g_j\right)$, avec k un opérateur de composition que nous allons détailler dans le paragraphe suivant.

4.4.3.1. Opérateur de composition

En informatique graphique, l'opérateur de composition le plus courant pour deux surfaces est l'opérateur union. En pratique, le maximum est mis en œuvre en utilisant la plus grande distance, car la singularité n'est numériquement jamais atteinte. Cependant, le mélange de deux surfaces implicites avec l'opérateur union peut provoquer un renflement indésirable de la peau. En plus, le mélange peut se produire même si les surfaces ne sont pas en contact. Dans notre cas, éviter ces

problèmes antérieurs est essentiel pour la crédibilité de la déformation. Pour cette raison, nous utilisons l'opérateur basé sur le gradient proposé par [54]. Cet opérateur est utilisé pour sa capacité à modéliser une surface de contact entre deux parties du maillage qui se croisent. La figure 4.5 illustre un exemple du processus de composition utilisant l'opérateur union et l'opérateur basé sur le gradient.

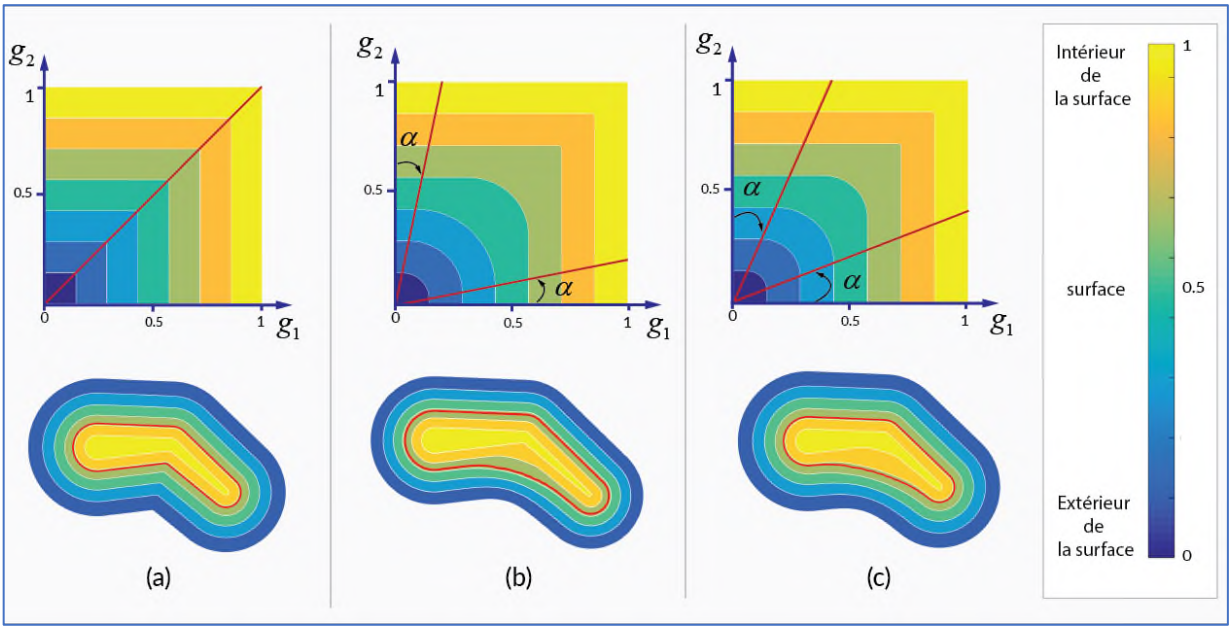


Figure 4-5 : Compositions effectuées à une paire de primitives implicites formant une articulation ; (a) avec l'opérateur d'union ; (b-c) mélange basé sur le gradient avec différentes valeurs de α

Pour chaque paire de segments du maillage voisins, soit g_1 et g_2 les fonctions de champ de l'approximation implicite à composer et k soit l'opérateur basé sur le gradient que nous utilisons dans la composition. La principale caractéristique du mélange basé sur le gradient est le paramètre θ utilisé pour contrôler la force de la composition. Ce paramètre est calculé en fonction de l'angle α entre les gradients de champ au point p, le champ G résultant du mélange est calculé comme suit :

$$G(p) = k(g_1, g_2, \theta) \qquad (4.8)$$

Le paramètre θ est calculé pour un point p en utilisant le "*mapping*" suivant :

$$\theta(\alpha)=\begin{cases}\theta_1 & si \quad \alpha \le \pi/8 \\ l_0(\alpha) & si \quad \alpha \in]\pi/8,\pi/2] \\ l_1(\alpha) & si \quad \alpha = \pi/2 \\ \theta_2 & si \quad \alpha > \pi/2\end{cases} \qquad (4.9)$$

avec θ_1 et θ_2 deux paramètres définis par l'utilisateur pour préciser les limites d'application d'union ou du mélange, $l_0(\alpha)=\sqrt{\left(e\left(1-\frac{4\alpha}{\pi}\right)\right)}+\frac{\pi}{10}$, $l_1(\alpha)=\left(e\left(\frac{4\alpha}{\pi}-1\right)\right)+\frac{\pi}{10}$ et $e(x)=1-\exp\left(1-\frac{1}{1-\exp(1+1/x)}\right)$.

Pratiquement, le paramétrage de l'équation 4.9 signifie que nous utilisons l'union pour des angles plus que $\pi/8$. Ensuite, le renflement augmente jusqu'à un maximum et il est conservé pour des angles plus élevés.

Nous notons que l'angle α peut être défini comme l'angle entre les os associé aux segments g_1 et g_2. Cependant, cette approche ne permet pas de distinguer les côtés externe et interne de l'articulation, comme le montre la figure 4.6 ci-après. Nous suivons une stratégie dont le but de lever l'ambiguïté entre les deux cas. Plus précisément, nous décrivons α comme étant l'angle entre les gradients de deux champs adjacents g_1 et g_2.

Cette méthode de mélange suppose que les champs sont colinéaires sur le côté extérieur des articulations, alors qu'ils sont séparés par un angle proche de α sur le côté intérieur. Malheureusement, comme nous pouvons le voir sur la figure 4.6, ce n'est pas vrai dans la plupart des scénarios, ce qui peut conduire à des artefacts. Pour résoudre ce problème, nous définissons le poids de mélange compris entre 0 et 1 pour chaque sommet, dans la pose initiale du maillage. La partie interne des doigts a des valeurs plus élevées pour produire des renflements, tandis que le reste de la main est nul pour avoir une union pure. Le calcul de ce coefficient est basé sur les coordonnées osseuses locales des sommets.

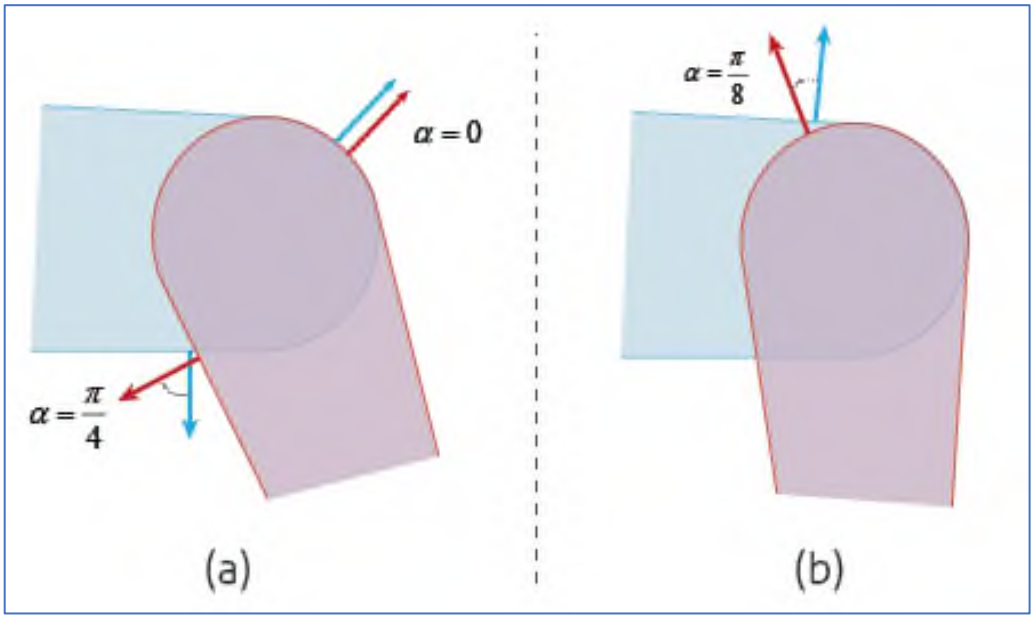


Figure 4-6 : Tracé des gradients de fonction de distance pour une articulation ; (a) les gradients colinéaires à l'extérieur de l'articulation ; (b) position où les gradients ne sont pas colinéaires

4.4.4. Suivi du maillage

Le suivi du maillage est utilisé pendant l'animation pour corriger la déformation du maillage produite soit par l'enrobage linéaire (LBS), ou par *"Dual quaternion"* (DQS). L'idée principale est de projeter chaque sommet de telle sorte que sa distance à la surface volumétrique soit la même que dans sa pose initiale. Pour ce faire, la projection du sommet est effectuée à plusieurs reprises jusqu'à sa convergence. Enfin, nous appliquons un lissage Laplacien dans les régions du contact pour réduire les traits nets produits par les étapes de projection.

4.4.4.1. Projection des sommets

Lors de l'étape de projection du sommet, chaque sommet v est déplacé le long du gradient de sa fonction de champ g associée jusqu'à ce qu'il atteigne sa distance d'origine d_{init} par rapport à la surface volumétrique. Nous utilisant des itérations de Newton avec $\sigma = 0.35$, afin de fournir une convergence robuste, rapide et précise. La projection est effectuée à l'aide de la formule suivante

$$v' = v + \sigma\left(d_{init} - g(v)\right)\frac{\nabla g(v)}{\|g(v)\|} \quad (4.10)$$

Le principal critère de convergence est lorsque le sommet a atteint sa distance initiale par rapport à sa surface volumétrique associée, c'est-à-dire lorsque $\left|d_{init} - g(v)\right| < \varepsilon$.

De plus, afin d'éviter les auto-intersections dans le maillage, nous devrions arrêter l'itération lorsque les sommets atteignent une région de contact. Les surfaces de contact correspondent aux discontinuités du gradient du champ de potentiel. Pour détecter le contact, nous effectuons le test suivant durant la projection : pour chaque sommet, nous gardons la trace de l'angle λ entre les gradients de deux itérations consécutives. Si l'angle λ est supérieur à une valeur $\lambda_{\max}$ qui est définie par l'utilisateur, on considère que le sommet se trouve sur une surface de contact. Pour nous simulation, nous avons choisi $\lambda_{\max} = 25^{\circ}$.

4.4.4.2. Relaxation tangentielle des sommets

La position initiale d'un sommet généré par une transformation d'enrobage standard (LBS ou DQS) peut être très loin de sa position optimale. Ainsi, se limiter seulement à étape la projection précédente peut produire des distorsions des faces du maillage et causer des auto-intersections. Dans l'objectif d'améliorer le suivi des sommets dans le champ de gradient, nous avons introduit en plus une étape de relaxation tangentielle qui effectuée après l'étape de projection. Cette étape consiste à faire bouger chaque sommet vers le barycentre pondéré de ses sommets voisins.

Précisément, soit un sommet v, et q_j son premier anneau de sommet voisin projeté sur son plan tangent. Dans une première étape, nous cherchons les coordonnées barycentriques ψ_j à l'aide de la méthode des coordonnées moyennes (*Mean Value Coordinates*) [65] tel que $v = \sum_j \psi_j q_j$.

Chaque étape de relaxation déplace les sommets de façon tangentielle en utilisant l'expression suivante :

$$v' = (1-\eta)v + \eta \sum_j \psi_j q_j \quad (4.11)$$

avec $\eta \in [0,1]$ un paramètre qui permet de contrôler la force de la relaxation.

La relaxation n'a pas d'effet sur le maillage à l'état de repos, tandis qu'après la déformation et la projection elle améliore la répartition des sommets en reproduisant leur organisation initiale. Pratiquement, une étape de relaxation est appliquée après chaque étape de projection d'un sommet. Le paramètre η est défini de façon à ce que les sommets proches de leur distance d_{init} (par rapport au modèle volumétrique) ciblée soient légèrement déplacés. Ceci est configuré par :

$$\eta = \max\left(0{,}1 - \left(\left|g(v) - d_{init}\right| - 1\right)^4\right) \quad (4.12)$$

4.4.4.3. Lissage de surface

Nous utilisons le lissage Laplacien pour éliminer les caractéristiques pointues introduites par les étapes de projection précédentes. Ce lissage doit être appliqué immédiatement après la dernière projection du sommet en utilisant la formule suivante :

$$\tilde{v} = (1 - \mu)v' + \mu C_v \quad (4.13)$$

Chaque sommet v' après la projection est déplacé vers le centroïde C_v qui est le barycentre de son premier anneau de voisinage. Le paramètre μ contrôle le taux du lissage. Cette étape de lissage est appliquée seulement pour les sommets du maillage situés dans des zones de contact, de façon à ce que les détails présentés ailleurs dans la surface du maillage soient réservés. Pour ce faire, nous avons défini le paramètre $\mu = 1$ pour les sommets arrêtés à une discontinuité de gradient, et $\mu = 0$ pour les autres sommets. Un exemple de résultat du lissage Laplacien est illustré sur la figure 4.7. Comme résultat, cette étape permet de lisser efficacement les oscillations du maillage sur les arêtes,

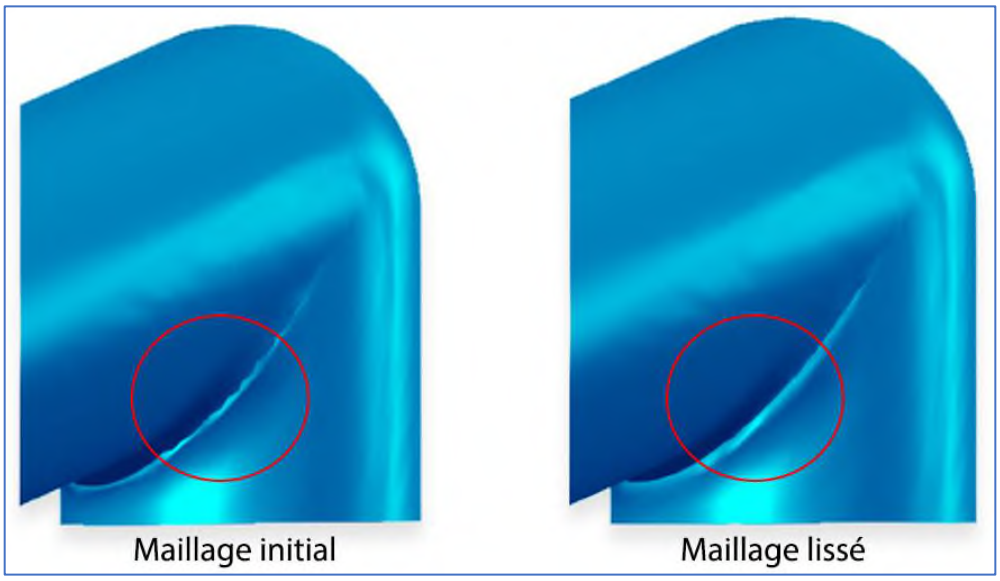


Figure 4-7 : (a) Surface du maillage présentant un motif en dents de scie ; (b) maillage après l'application du lissage Laplacien

4.4.5. Algorithme de déplacement des sommets

Nous commençons le processus de déformation par partitionner le maillage de la main en segments suivant les articulations du squelette. Puis, pour chaque segment du maillage nous ajoutons des primitives sphériques au niveau des articulations. Ensuite, nous construisons la forme volumétrique M_e associée à chaque segment du maillage à l'aide des primitives sphériques (paragraphe 4.4.1). Ensuite, pour chaque sommet v nous calculons et stockons sa distance d_{init} par rapport à sa forme volumétrique associée M_e. Dans nos simulations, la déformation initiale du maillage est effectuée en utilisant la méthode de DQS. Cette transformation est appliquée aussi sur les formes volumétriques M_e. Ensuite pour chaque forme M_e, nous générons sa primitive à support compact g_e (champ potentiel) associée. Puis, nous composons tous les champs potentiels g_e pour construire un champ global G.

Au final, nous corrigeons les positions des sommets du maillage de manière à ce qu'ils gardent la même distance par rapport à la forme volumétrique. L'algorithme 4.1 décrit le processus de marche d'un sommet pour corriger sa position après la déformation du maillage.

Algorithme 4.1 : Déformation implicite basée sur des forme volumétrique

Entrée : Champ potentiel G ; Sommet v avec d_{init} sa distance initiale par rapport à M_e ; δ un facteur d'itération
Sortie : Nouvelle position de v

1. Calculer la valeur du champ en v : $f = G(v)$
2. Calculer le gradient en v : $\vec{h} = \nabla G(v)$
3. Calculer la distance $d = f - d_{init}$
4. **Si** $|d| < \tau$ **alors** *// Cas d'arrêt : le point est déjà à une distance* d_{init}
5. **Retourne** v
6. **Fin si**
7. Calculer le vecteur de déplacement $\vec{k} = -\delta d \dfrac{\vec{h}}{\left\|\vec{h}\right\|^2}$
8. Calculer $v' = v + \vec{k}$ *//Avancer le point dans la direction du déplacement*

9. Calculer la distance $d' = G(v') - d_{init}$

10. Si $d(d - d') < 0$ **alors** *//Cas d'arrêt : la distance entre* v *et la forme a augmenté*

11. **Retourner** v

12. Fin si

13. Retourner v' *// Distance avancée d'une longueur totale de* $\vec{k}$

4.5. Résultats de simulation

Dans le présent paragraphe, nous évaluons les résultats obtenus par l'approche de DBVS qui démontrent son efficacité en matière de plausibilité visuelle et performances d'exécution. Les résultats présentent des améliorations au niveau de la déformation d'un maillage de main virtuelle, par l'utilisation de deux méthodes classiques d'enrobage (LBS et DQS).

Comme expliqué dans le paragraphe 4.3, les données d'entrée sont le maillage de main et le squelette d'animation. Nous avons utilisé le logiciel de simulation Blender [20] pour créer et ajuster les poids d'enrobage. En se basant sur ces poids, nous avons pu partitionner le maillage autour de chaque os à l'aide d'un script sous MATLAB [134]. Plus précisément, chaque sommet a été attribué à l'os avec le poids le plus élevé (figure 4.8).

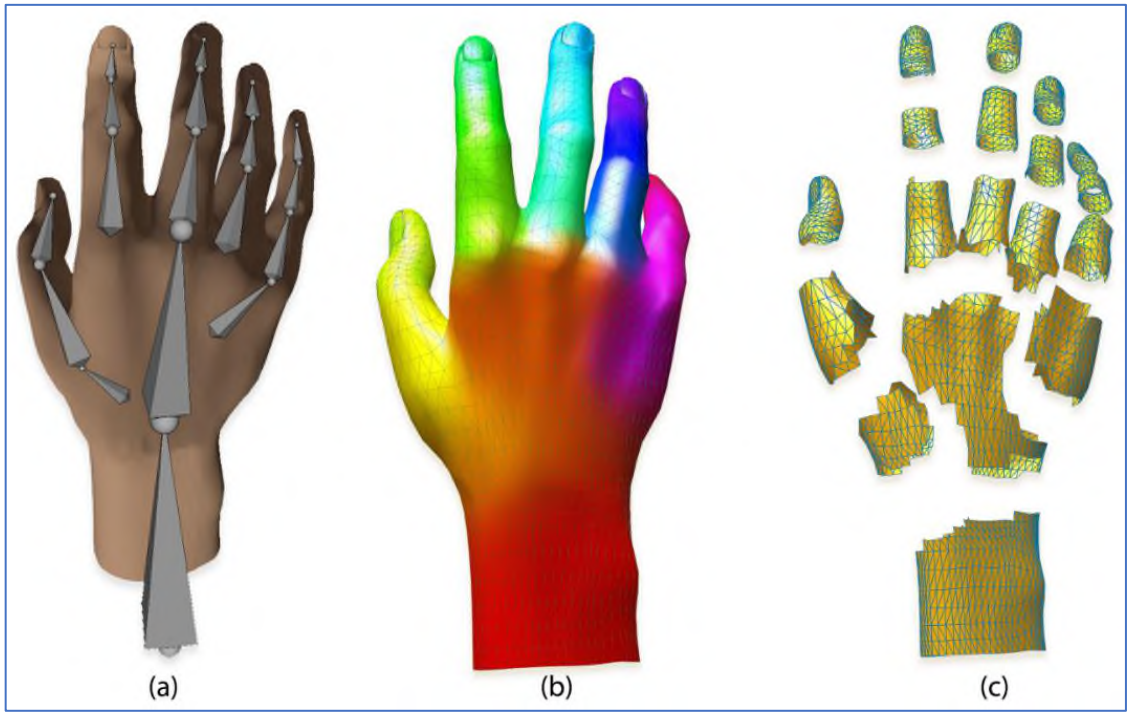


Figure 4-8 : Configuration d'entrée ; (a) squelette d'animation ; (b) poids d'enrobage ; (c) partitionnement du maillage

Le partitionnement est nécessaire pour la reconstruction de surface, qui a été faite avec des primitives sphériques. Les positions des sphères sont données en entrée, et chaque sphère est affectée à un os, il reste donc un peu de travail pour faire l'approximation du maillage par des primitives sphériques. La figure 4.9 montre une illustration des approximations que nous avons effectuées pour le modèle de la main.

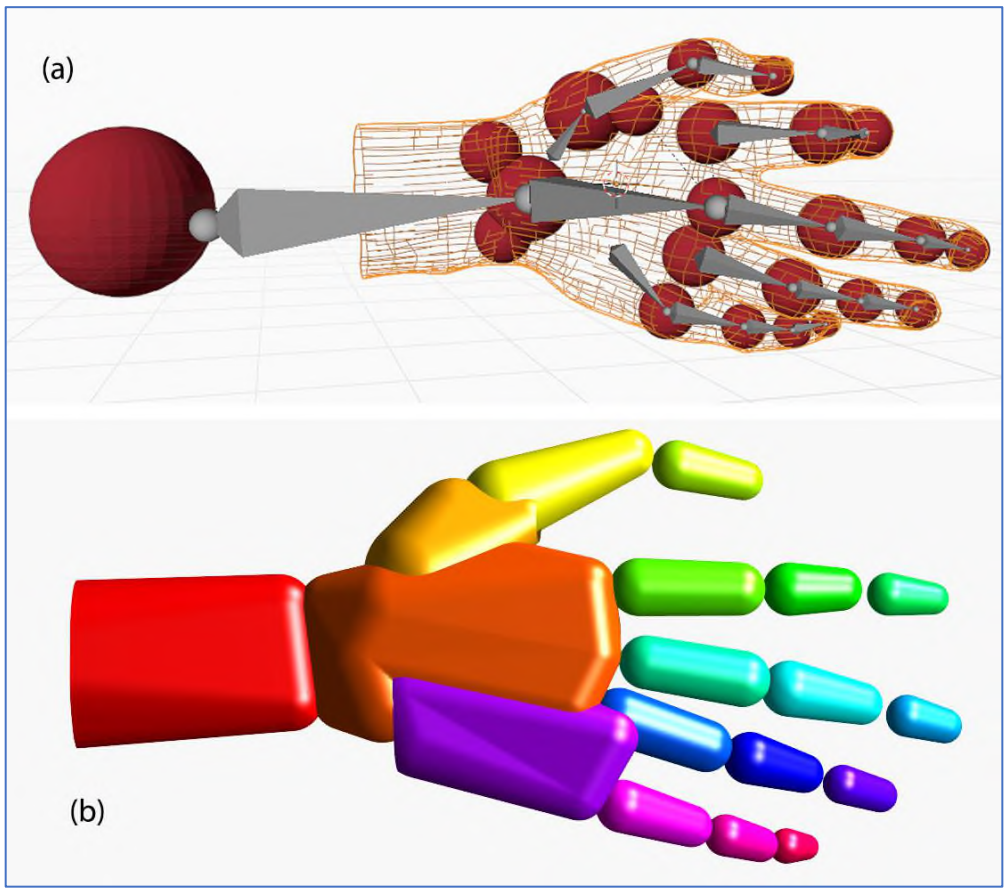


Figure 4-9 : (a) Définition des sphères au niveau des articulation de squelette d'animation ; (b) représentation volumétrique résultante

Obtenir les approximations correctes de la surface du maillage était un peu plus difficile. Le premier problème que nous avons résolu a été de combler les trous laissés aux extrémités des segments du maillage. Ceci est important car deux surfaces voisines doivent se joindre sans introduire de lacunes ou de discontinuités de gradient. De ce point de vue, les primitives sphériques sont meilleures, comme on peut le voir sur la figure 4.10.

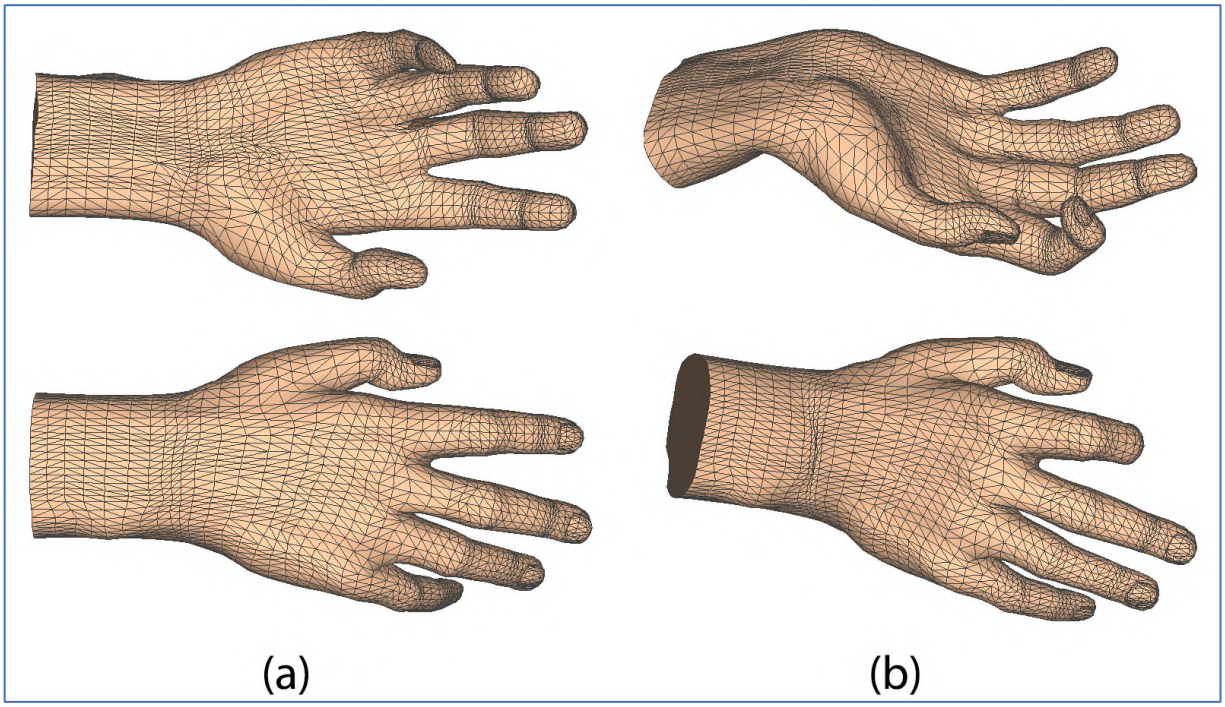


Figure 4-10 : Composition des segments de main lors de la déformation est effectuée sans introduire de lacunes ; (a) maillage initial ; (b) maillage déformé

Nous avons testé notre approche avec trois opérateurs de composition (union, gradient, poids de mélange). La rangée du haut de la figure 4.11 montre les formes volumétriques combinées avec l'opérateur union, l'opérateur basé sur le gradient et l'opérateur utilisant le poids de mélange. Dans la rangée du bas, le résultat de la colonne (a) montre une simulation mal ajustée produite par l'opérateur d'union. La colonne (b) montre une simulation avec un effet de renflement plus exagéré cela ressemble à une mauvaise déformation. La simulation de la colonne (c) montre que le maillage est plus attrayant du côté intérieur lorsque nous utilisons l'opérateur de composition basé sur le gradient contrôlé avec un poids de mélange.

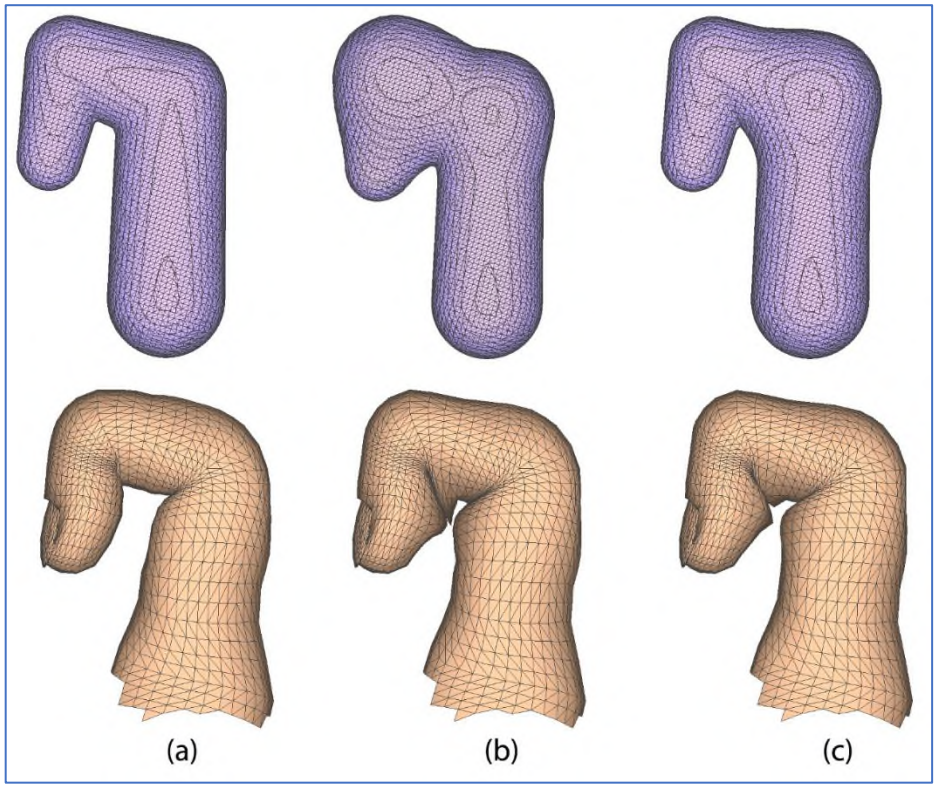


Figure 4-11 : Déformation d'index avec différentes compositions des formes volumétriques ; (a) en utilisant l'opérateur union ; (b) avec l'opérateur basé sur le gradient ; (c) en utilisant un poids de mélange

4.6. Performances de calcul

Nous avons effectué les simulations sur un PC avec processeur Intel i7-4720HQ de capacité 2.60 GHz, un GPU GeForce 480 GTX, et une RAM de 16GB. Toutes les fonctions sont vectorisées par sommets, ce qui permet des performances de calcul décentes.

Nous avons utilisé deux maillages de main virtuelle ; le premier à basse résolution avec 3 056 sommets, tandis que la deuxième à haute résolution avec 13 236 sommets. Dans le tableau 4.1, nous avons résumé les performances de déformation des deux maillages en utilisant la méthode de déformation basée sur les formes volumétriques (DBVS) et la méthode HRBF proposé par Vaillant et al. [138, 139] ainsi que la déformation avec l'enrobage classique en DQS.

Les simulations avec la méthode de DBVS (tableau 4.1) sont effectuées en utilisant deux opérateurs de mélange (union et mélange basé gradient). À partir de ces résultats, nous notons que la déformation en DBVS est plus rapide en temps d'exécution que la méthode basée sur les HRBF. Davantage, l'utilisation de l'opérateur d'union accélère plus le processus de déformation.

Maillage	Méthode DBVS (s)	Méthode HRBF (s)	Méthode DQS (ms)
Basse résolution (Mélange basé gradient)	4.0	5.2	14.5
Haute résolution (Mélange basé gradient)	5.6	8.6	92
Basse résolution (Union)	0.76	1.4	6.5
Haute résolution (Union)	1.35	2.15	7.7

Tableau 4-1 : Temps d'exécution de l'approche de DBVS en comparaison avec l'approche d'HRBF [138] et l'approche de DQS

4.7. Paramètres du contrôle de la déformation

Lors de l'animation, le choix de la méthode d'enrobage utilisée pour obtenir une déformation initiale est un critère qui influence le résultat final de la déformation. Dans notre implémentation, nous prenons en charge les méthodes de LBS et DQS (Annexe B et C), mais d'autres méthodes pourraient être facilement intégrées. Par défaut, nous utilisons le DQS car il permet d'éviter le problème de perte de volume connu sous le nom *d'effet d'enveloppe de bonbons* et il est moins susceptible de produire des auto-intersections profondes.

Le seuil R est un autre paramètre de contrôle de la déformation utilisé pour convertir les champs à support global en champ à support compact (paragraphe 4.4.2). Ce paramètre a pour effet d'augmenter ou de diminuer le renflement (figure 4.12).

D'après ces résultats, nous pouvons voir que les renflements musculaires augmentent au fur et à mesure que le seuil augmente. L'utilisateur peut donc modifier ce paramètre, pour arriver au renflement musculaire souhaité.

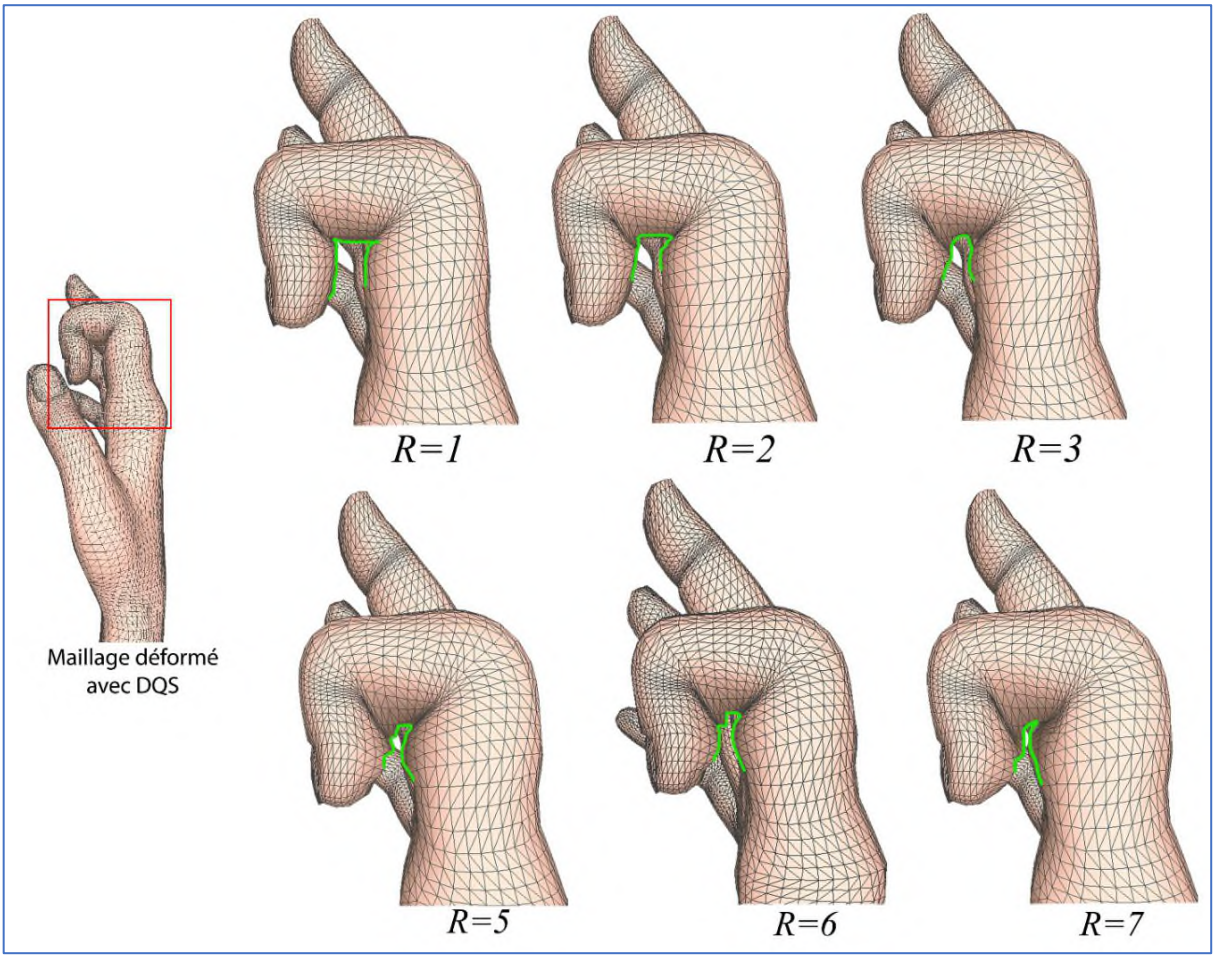


Figure 4-12 : Index déformé avec différentes valeurs du seuil R

Le contrôle fin de l'effet de renflement est effectué par les paramètres θ_1 et θ_2 qui sont utilisés dans l'étape de composition. Ils peuvent être modifiés pour simuler différents types de matériaux, comme le caoutchouc ou la peau. Parce qu'il est assez fastidieux de les régler correctement et que nous ne nous intéressions qu'aux déformations de la main, nous avons généralement utilisé les paramètres cités dans le paragraphe 4.4.3. La figure 4.13 illustre l'impact des deux paramètres θ_1 et θ_2 sur le renflement de muscle lors de la déformation d'index.

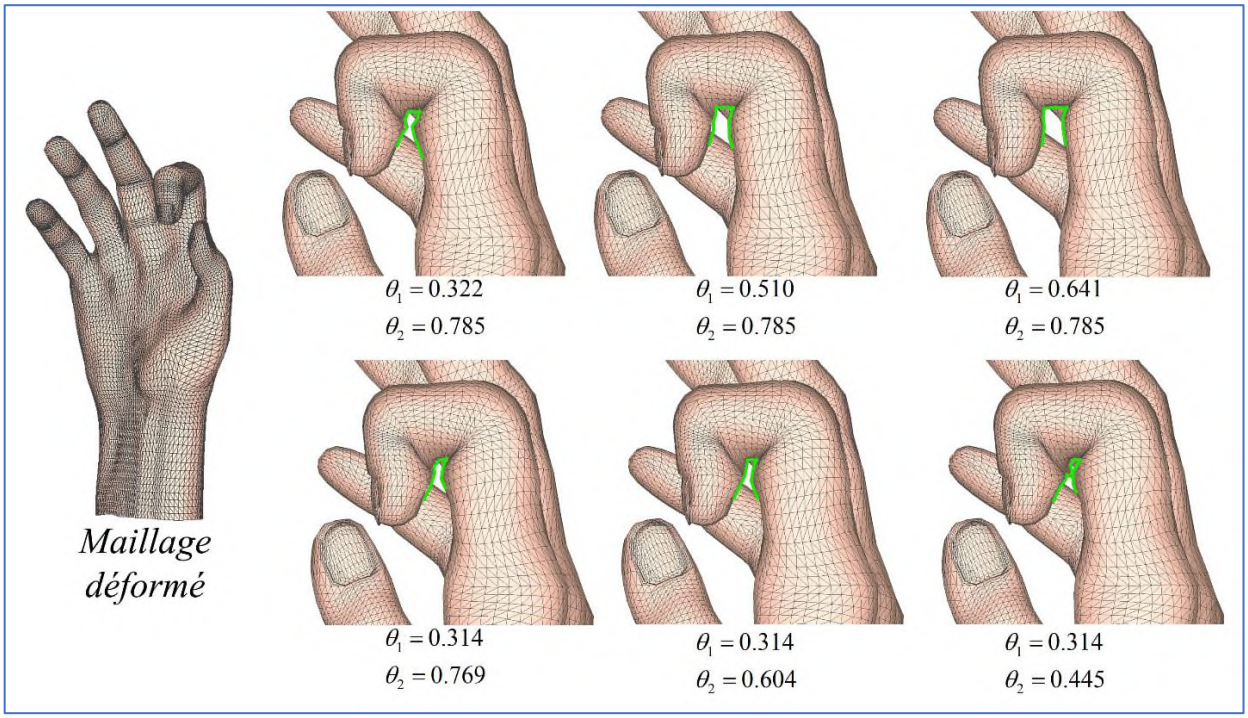


Figure 4-13 : Impact du choix des paramètres θ_1 et θ_2 sur le renflement des muscles lors de la déformation

4.8. Comparaison de DBVS avec les méthodes alternatives

a) Comparaison avec la méthode de DQS

Nous avons effectué une comparaison en matière de qualité de résultats entre la méthode de DBVS et la méthode de DQS. Bien que cette dernière soit connue par son succès à résoudre l'effet d'enveloppe de bonbons, elle souffre encore de problème de perte de volume. Les résultats montrent que la qualité de déformation est significativement améliorée en utilisant la méthode de DBVS après une déformation initiale en utilisant DQS, comme illustré sur la figure 4.14, les régions améliorées sont marquées par des cercles rouges.

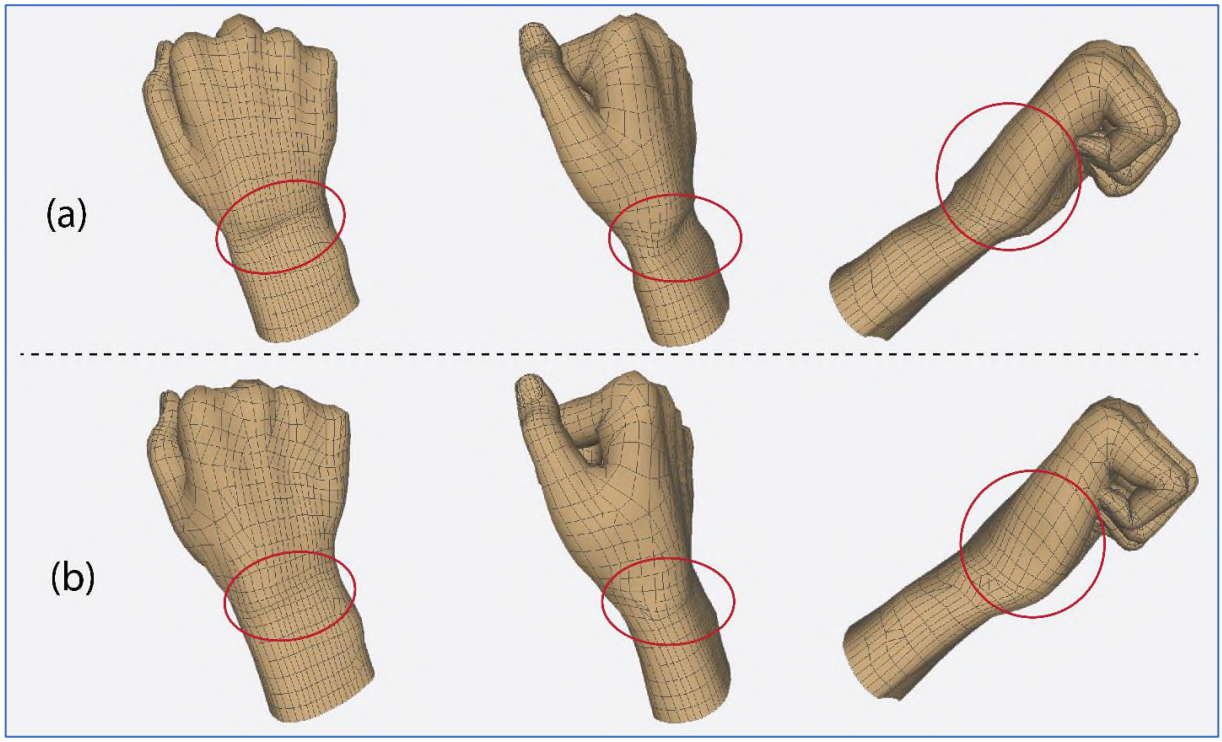


Figure 4-14 : Comparaison de DBVS avec la méthode DQS ; (a) déformation avec DQS ; (b) déformation avec DBVS ; Le cercle rouge montre les régions améliorées par DBVS

b) Comparaison avec la méthode de LBS

Nous pouvons également montrer l'efficacité de la déformation par DBVS pour préserver le volume du maillage et éviter les auto-intersections résultantes avec l'utilisation de la méthode LBS. Ces artefacts, apparaissent en majorité dans les régions de contact comme on peut le voir sur la figure 4.15.

On peut observer sur le maillage de ce modèle l'effet de perte de volume et de génération d'auto-intersections lorsqu'il est déformé avec la méthode LBS (figure 4.15 (a)), l'effet de gonflement avec des quaternions duaux (figure 4.15 (b)), et l'amélioration de ces problèmes avec l'approche de DBVS (figure 4.15 (c)).

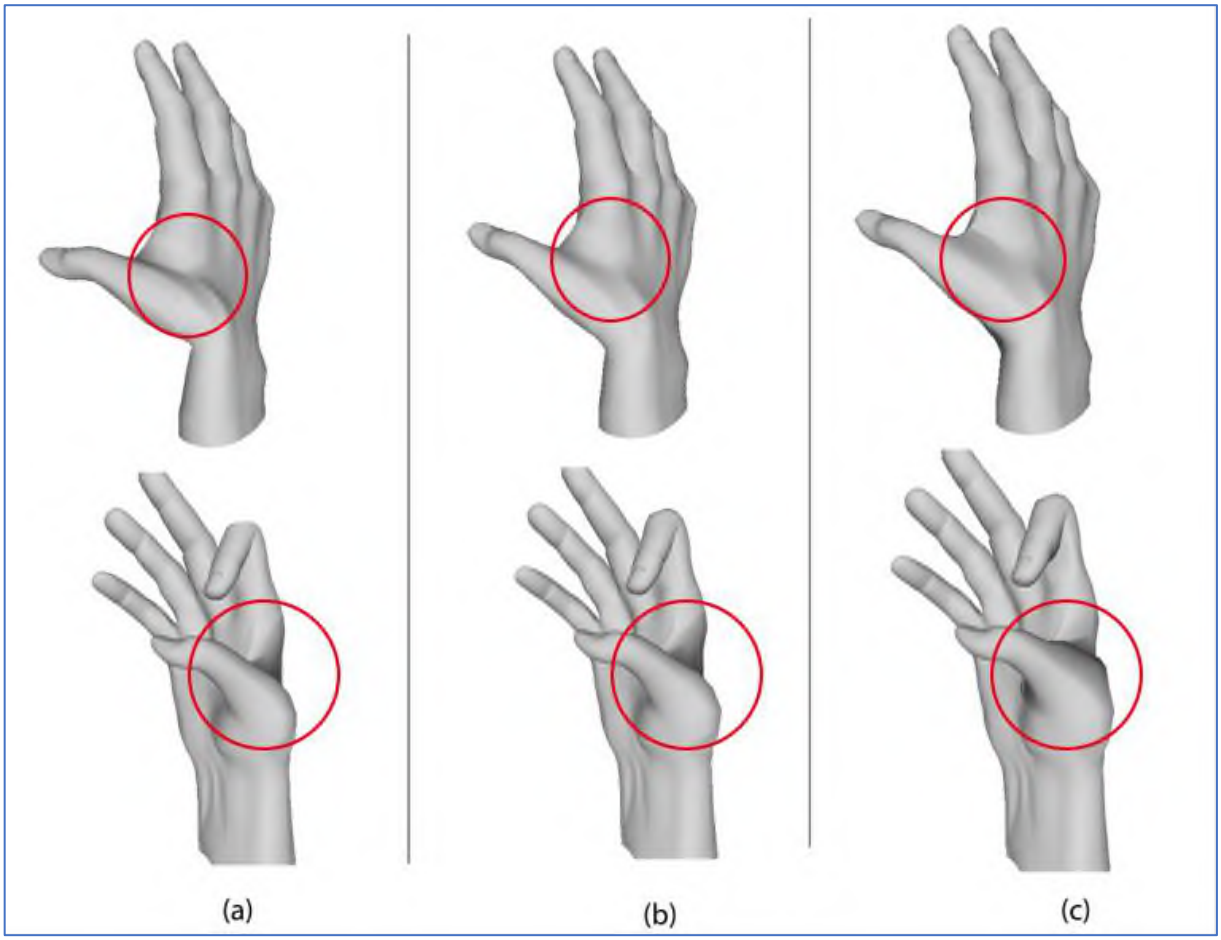


Figure 4-15 : Comparaison des résultats de déformation avec (a) LBS ; (b) Dual-quaternion ; (c) DBVS ; Le cercle rouge montre les régions de contact ciblées par l'amélioration

c) Comparaison avec la méthode d'HRBF

Nous avons comparé la méthode de DBVS avec la méthode de HRBF [138]. Cette dernière suit la même idée d'ajustement de position des sommets une déformation initiale effectuée après un enrobage classique. Les figures 4.16 et 4.17 illustrent les résultats de cette comparaison.

Comme on peut le voir sur la figure 4.16, la déformation de l'index en utilisant les HRBF génère des distorsions dans la partie supérieure de la surface d'index. Ceci est dû à l'approximation en iso-surface utilisée pour contrôler la déformation du maillage. Par contre, le maillage de l'index est plus attrayant lors de l'application de DBVS.

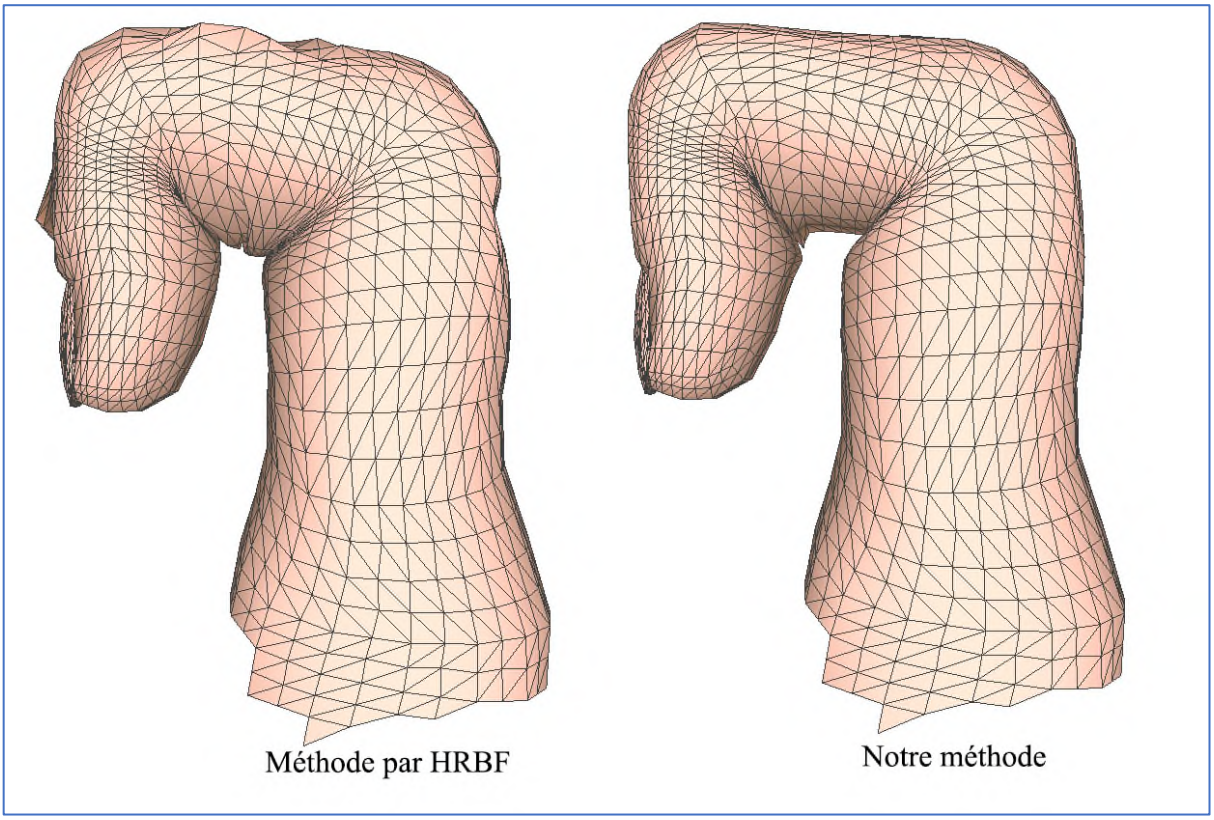


Figure 4-16 : Comparaison de la déformation DBVS avec HRBF au niveau de la forme du maillage

La déformation à base de HRBF peut également souffrir du problème des surfaces qui ne se joignent pas en douceur. En effet, le poignet, la paume et les bases du pouce et du petit doigt sont composés de surfaces approximativement planes. Ainsi, il peut arriver que ces surfaces soient mal alignées. Ceci est montré sur la figure 4.17, où l'on peut voir une bosse près du poignet dans le cas d'une approche HRBF. Par contre, la méthode DBVS produit des meilleurs résultats. En effet, le mélange effectué à l'aide d'opérateur basé sur un gradient contrôlé par le paramètre de pondération permet d'éviter ce genre de problème.

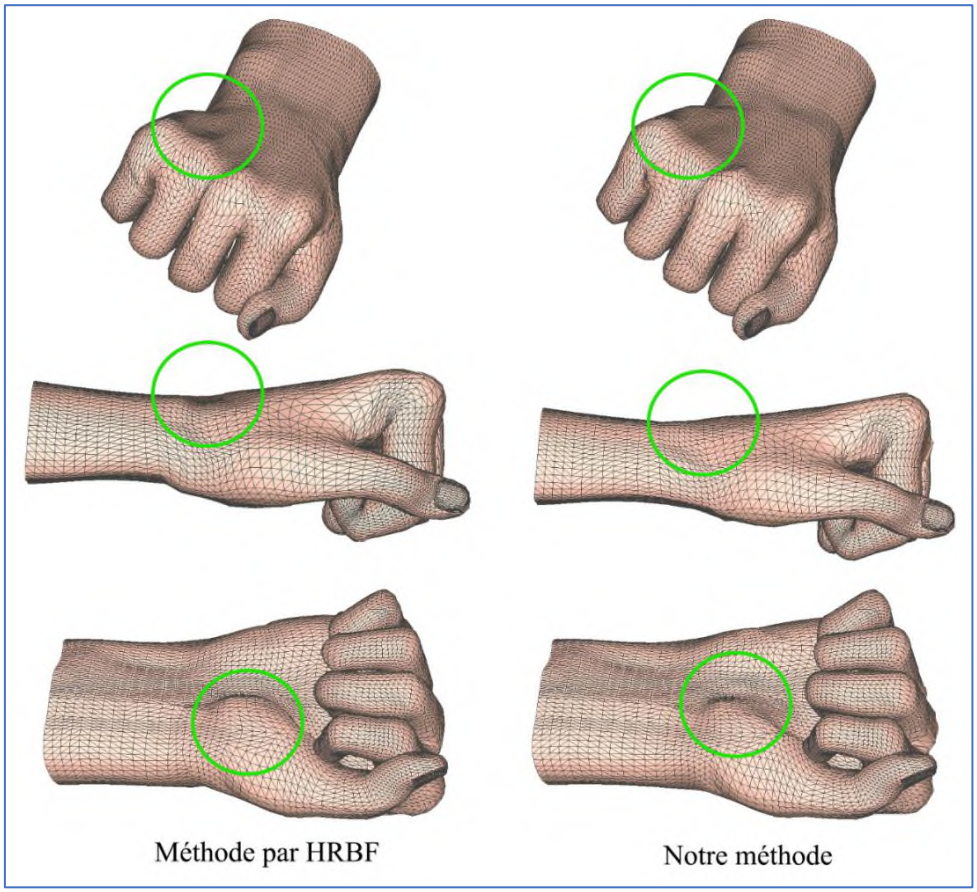


Figure 4-17 : Comparaison de DBVS avec HRBF au niveau de l'alignement de surfaces

4.9. Conclusion

Dans le présent chapitre nous avons présenté une contribution qui rentre dans le cadre de travaux de recherche sur la modélisation et l'animation des corps mous virtuels associés à un squelette. La contribution concerne la méthode de déformation basée sur des formes volumétriques (DBVS) qui fonctionne comme une étape de post-traitement sur une simulation du maillage de la main déformé à l'aide des méthodes d'enrobage standard. Nous avons détaillé ses différentes étapes, puis nous avons présenté les résultats obtenus avec différents paramètres de simulation. Nous avons aussi, comparé ces résultats avec ceux des autres méthodes à savoir les méthodes de LBS, DQS et HRBF. Les résultats des simulations et de comparaison sont très satisfaisants. En effet, les différents résultats montrent, d'une part, la qualité de la simulation produite par la méthode DBVS et d'autre part, l'impact des paramètres de contrôle sur les résultats obtenus. Les résultats sont encourageants surtout que le processus de DBVS s'adapte bien avec le pipeline disponible dans les logiciels de modélisation et déformation.

Conclusion générale

Au cours de cette thèse, nous avons présenté différentes approches d'animation et de modélisation des objets 3D dont certaines caractéristiques géométriques sont conservées une fois plongées dans une scène d'animation 3D. Les méthodes permettent d'améliorer l'aspect intrinsèque des objets tout en donnant à l'artiste un contrôle sur le résultat de la simulation. Le but des méthodes présentées dans ce document était de réaliser des modèles plausibles tout en assurant :

- Une crédibilité visuelle des modèles 3D résultants.
- Un degré de contrôle de l'utilisateur sur les résultats de la déformation.
- Une efficacité au niveau du temps de calcul des simulations.

Le premier chapitre a été consacré à la présentation de l'état de l'art des différentes méthodes de modélisation et de déformation de modèles virtuels. Nous avons détaillé les différentes méthodes de représentation de surface pour l'animation et la modélisation, et les deux approches de déformation les plus utilisées à savoir les approches physiques et géométriques. Enfin, nous avons passé en revue les approches de déformation alternatives qui préservent les contraintes intrinsèques de la surface (volume ou longueurs).

Le deuxième chapitre a été consacré à la présentation d'une nouvelle méthode de génération de plis pour les vêtements portés par des personnages. Nous avons explicité la méthode de déformation du maillage du vêtement en utilisant une approximation avec des surfaces implicites basées sur les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF). Nous avons ensuite détaillé le processus de génération de plis en se basant sur la génération des courbes de plis dans les régions affectées par une forte déformation du maillage.

Le troisième chapitre a été consacré à la présentation d'une nouvelle méthode de positionnement du vêtement sur un corps humain 3D avec différentes formes et postures. Cette méthode nécessite aucun modèle de référence et elle est basée sur l'idée d'établir une correspondance entre le corps humain cible et le modèle du vêtement. Afin d'assurer cette correspondance, nous avons effectué une déformation du maillage du vêtement à l'aide de la méthode de déformation basée sur l'approximation par des fonctions de base radiale d'Hermite (HRBF).

Le quatrième chapitre présente une nouvelle méthode de déformation implicite basée sur le suivi du maillage à l'aide des formes volumétriques. Cette contribution a pour objectif de surmonter les défauts de l'enrobage standard (LBS et DQS), en ajoutant une étape de correction comme post-traitement du maillage déformé. La correction des positions est effectuée à l'aide du suivi des distances des sommets par rapport à la forme volumétrique.

La qualité des travaux présentés dans cette thèse est confirmée et validée par des expérimentations détaillées sur divers modèles et scènes 3D, ainsi que par des comparaisons avec des méthodes bien établies dans la littérature.

Dans la continuité de cette thèse, des améliorations sont encore envisageables, et ce, à plusieurs niveaux :

- Améliorer la méthode d'ajout de plis afin de supporter l'approximation des vêtements avec des surfaces ouvertes (*Openboundary Surfaces*) telles que les vêtements ouverts (châle, jacket …) ;
- Améliorer la méthode d'ajout de plis afin qu'elle puisse générer des plis statiques qui se présentent dans les zones de courbure gaussienne négative ;
- Nous suggérons que les travaux futurs explorent la sélection de direction des plis en se basant sur un choix d’utilisateurs ;
- Étudier la satisfaction des consommateurs potentiels en recueillant leurs évaluations des résultats de l'habillage des vêtements (système d’essayage).

Bibliographie

[1] Ait Mouhou, A., Saaidi, A., Ben Yakhlef, M., & Abbad, K. (2017). Analytical View of Augmenting Coarse Cloth Simulations with Wrinkles. In First International Conference on Real Time Intelligent Systems (pp. 497-507). Springer, Cham.

[2] Ait Mouhou, A., Saaidi, A., Ben Yakhlef, M., & Abbad, K. (2019, December). A study and implementation of the hand deformation using implicit skinning. In 2019 International Conference on Intelligent Systems and Advanced Computing Sciences (ISACS) (pp. 1-7). IEEE.

[3] Ait Mouhou, A., Saaidi, A., Ben Yakhlef, M., & Abbad, K. (2021). Wrinkle synthesis for cloth mesh with Hermite radial basis functions. Multimedia Tools and Applications, 80(1), 1583-1610. DOI: https://doi.org/10.1007/s11042-020-09743-3

[4] Ait Mouhou, A., Saaidi, A., Ben Yakhlef, M., & Abbad, K. Virtual Hand Skinning Using Volumetric Shape, International Journal of Computer Aided Engineering and Technology (In Production).

[5] Alexa, M. (2002). Linear combination of transformations. ACM Transactions on Graphics (TOG), 21(3), 380-387.

[6] Anderson, E. F. (2001). Real-time character animation for computer games (Doctoral dissertation, The National Centre for Computer Animation).

[7] Angelidis, A., & Singh, K. (2006). Space deformations and their application to shape modeling. In ACM SIGGRAPH 2006 Courses (pp. 10-29).

[8] Angelidis, A., Wyvill, G., & Cani, M. P. (2004, June). Sweepers: Swept user-defined tools for modeling by deformation. In Proceedings Shape Modeling Applications, 2004. (pp. 63-73). IEEE.

[9] Anguelov, D., Srinivasan, P., Koller, D., Thrun, S., Rodgers, J., & Davis, J. (2005). Scape: shape completion and animation of people. In ACM SIGGRAPH 2005 Papers (pp. 408-416).

[10] Anjyo, K., Todo, H., & Lewis, J. P. (2012). A practical approach to direct manipulation blendshapes. Journal of Graphics Tools, 16(3), 160-176.

[11] Assassin's Creed Syndicate jeu video de Ubisoft site web (2021): https://www.ubisoft.com/en-us/game/assassins-creed-syndicate/

[12] Aujay, G., Hétroy, F., Lazarus, F., & Depraz, C. (2007, August). Harmonic skeleton for realistic character animation. In SCA'07-ACM-SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (pp. 151-160). Eurographics Association.

[13] Autodesk 3ds Max, (***site web 2021***): https://www.autodesk.com/3ds-max/

[14] Autodesk Maya, (***site web 2021***): http://autodesk.com/maya

[15] Baraff, D., & Witkin, A. (1998, July). Large steps in cloth simulation. In Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 43-54).

[16] Baran, I., & Popović, J. (2007). Automatic rigging and animation of 3d characters. ACM Transactions on graphics (TOG), 26(3), 72-es.

[17] Bergou, M., Mathur, S., Wardetzky, M., & Grinspun, E. (2007). Tracks: toward directable thin shells. ACM Transactions on Graphics (TOG), 26(3), 50-es.

[18] Bernhardt, A., Barthe, L., Cani, M.-P. & Wyvill, B. (2010), Implicit Blending Revisited. Computer Graphics Forum, 29: 367-375.

[19] Bhatnagar, B. L., Tiwari, G., Theobalt, C., & Pons-Moll, G. (2019). Multi-garment net: Learning to dress 3d people from images. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 5420-5430).

[20] Blender, open-source 3D computer graphics software, (***site web 2021***): https://www.blender.org/

[21] Blinn, J. F. (1982). A generalization of algebraic surface drawing. ACM transactions on graphics (TOG), 1(3), 235-256.

[22] Bloomenthal, J. (1997). Bulge elimination in convolution surfaces. In Computer Graphics Forum (Vol. 16, No. 1, pp. 31-41). Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishers Ltd.

[23] Botsch, M., Kobbelt, L., Pauly, M., Alliez, P., & Lévy, B. (2010). Polygon mesh processing. CRC press.

[24] Botsch, M., Pauly, M., Rossl, C., Bischoff, S., & Kobbelt, L. (2006). Geometric modeling based on triangle meshes. In ACM SIGGRAPH 2006 Courses (pp. 1-es).

[25] Breen, D. E., House, D. H., & Wozny, M. J. (1994, July). Predicting the drape of woven cloth using interacting particles. In Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 365-372).

[26] Bridson, R., Fedkiw, R., & Anderson, J. (2002, July). Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation. In Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 594-603).

[27] Brouet, R., Sheffer, A., Boissieux, L., & Cani, M. P. (2012). Design preserving garment transfer. ACM Transactions on Graphics, 31(4), Article-No.

[28] Cani, M. P. (1993, August). An implicit formulation for precise contact modeling between flexible solids. In 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH'93)) (pp. 313-320). ACM SIGGRAPH.

[29] Cani-Gascuel, M. P., & Desbrun, M. (1997). Animation of deformable models using implicit surfaces. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 3(1), 39-50.

[30] Carignan, M., Yang, Y., Thalmann, N. M., & Thalmann, D. (1992). Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. ACM Siggraph Computer Graphics, 26(2), 99-104.

[31] Catmull, E., & Clark, J. (1978). Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. Computer-aided design, 10(6), 350-355.

[32] Cetinaslan, O., & Orvalho, V. (2018, June). Direct manipulation of blendshapes using a sketch-based interface. In Proceedings of the 23rd International ACM Conference on 3D Web Technology (pp. 1-10).

[33] Chen, M., & Tang, K. (2010). A fully geometric approach for developable cloth deformation simulation. The visual computer, 26(6), 853-863.

[34] Chen, Y., Zhu, Q. H., Kaufman, A., & Muraki, S. (1998, June). Physically-based animation of volumetric objects. In Proceedings Computer Animation'98 (Cat. No. 98EX169) (pp. 154-160). IEEE.

[35] Choi, K. J., & Ko, H. S. (2005). Stable but responsive cloth. In ACM SIGGRAPH 2005 Courses (pp. 1-es).

[36] Clemens G, Arnulph F & Volker L (2003) Automatic pre-positioning of virtual clothing. In Proceedings of the 19th Spring Conference on Computer Graphics (SCCG '03). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 99,108.

[37] Coquillart, S. (1990, September). Extended free-form deformation: A sculpturing tool for 3D geometric modeling. In Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 187-196).

[38] Crane, K. (2018). Discrete differential geometry: An applied introduction. Notices of the AMS, Communication, 1153-1159.

[39] Cutler, L. D., Gershbein, R., Wang, X. C., Curtis, C., Maigret, E., Prasso, L., & Farson, P. (2007). An art-directed wrinkle system for CG character clothing and skin. Graphical Models, 69(5-6), 219-230.

[40] Decaudin, P., Julius, D., Wither, J., Boissieux, L., Sheffer, A., & Cani, M. P. (2006, September). Virtual garments: A fully geometric approach for clothing design. In Computer Graphics Forum (Vol. 25, No. 3, pp. 625-634). Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishing, Inc.

[41] DeRose, T., Kass, M., & Truong, T. (1998, July). Subdivision surfaces in character animation. In Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 85-94).

[42] Doo, D., & Sabin, M. (1978). Behaviour of recursive division surfaces near extraordinary points. Computer-Aided Design, 10(6), 356-360.

[43] English, E., & Bridson, R. (2008). Animating developable surfaces using nonconforming elements. In ACM SIGGRAPH 2008 papers (pp. 1-5)

[44] Farin, G. (2014). Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical guide. Elsevier

[45] Faure, F., Gilles, B., Bousquet, G., & Pai, D. K. (2011). Sparse meshless models of complex deformable solids. ACM transactions on graphics (TOG), 30(4), 1-10.

[46] Foley, J. D., Van, F. D., Van Dam, A., Feiner, S. K., Hughes, J. F., Angel, E., & Hughes, J. (1996). Computer graphics: principles and practice (Vol. 12110). Addison-Wesley Professional.

[47] Fordham, J. (2003). Middle earth strikes back. Cinefex, 92, 71-142.

[48] Forsey, D. R., & Bartels, R. H. (1988). Hierarchical B-spline refinement. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 22(4), 205-212.

[49] Gain, J., & Bechmann, D. (2008). A survey of spatial deformation from a user-centered perspective. ACM Transactions on Graphics (TOG), 27(4), 1-21.

[50] Gilles, B., Faure, F., Bousquet, G., & Pai, D. K. (2013). Frame-based interactive simulation of complex deformable objects. In Deformation models (pp. 145-166). Springer, Dordrecht.

[51] Gillette, R., Peters, C., Vining, N., Edwards, E., & Sheffer, A. (2015, August). Real-time dynamic wrinkling of coarse animated cloth. In Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH/eurographics symposium on computer animation (pp. 17-26).

[52] Goldenthal, R., Harmon, D., Fattal, R., Bercovier, M., & Grinspun, E. (2007). Efficient simulation of inextensible cloth. In ACM SIGGRAPH 2007 papers (pp. 49-es).

[53] Gonzalez-Ochoa, C., & Peters, J. (1999, April). Localized-hierarchy surface splines (less). In Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics (pp. 7-15).

[54] Gourmel O, Barthe L et al (2013) A gradient-based implicit blend. ACM Trans. Graph. 32, 2, Article 12 (April 2013), 12 pages.

[55] Guan, P., Reiss, L., Hirshberg, D. A., Weiss, A., & Black, M. J. (2012). Drape: Dressing any

person. ACM Transactions on Graphics (TOG), 31(4), 1-10.

[56] Gundogdu E, Constantin V, Seifoddini A, Dang M, Salzmann M, Fua P (2019) GarNet: A Two-Stream Network for Fast and Accurate 3D Cloth Draping. IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Seoul, Korea (South), 2019, pp. 8738-8747.

[57] Hadap, S., Bongarter, E., Volino, P., & Magnenat-Thalmann, N. (1999, October). Animating wrinkles on clothes. In Proceedings Visualization'99 (Cat. No. 99CB37067) (pp. 175-523). IEEE.

[58] Hahn, F., Martin, S., Thomaszewski, B., Sumner, R., Coros, S., & Gross, M. (2012). Rig-space physics. ACM transactions on graphics (TOG), 31(4), 1-8.

[59] Hahn, F., Thomaszewski, B., Coros, S., Sumner, R. W., Cole, F., Meyer, M., ... & Gross, M. (2014). Subspace clothing simulation using adaptive bases. ACM Transactions on Graphics (TOG), 33(4), 1-9.

[60] Han X, Wu Z, Wu Z, Yu, S. Davis L (2018) VITON: An Image-Based Virtual Try-on Network. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, 2018, pp. 7543-7552,

[61] Hart, J. C. (1998). Morse theory for implicit surface modeling. In Mathematical Visualization (pp. 257-268). Springer, Berlin, Heidelberg.

[62] Hétroy, F., Gérot, C., Lu, L., & Thibert, B. (2009, February). Simple flexible skinning based on manifold modeling. In GRAPP 2009-International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (pp. 259-265).

[63] Hirota, G., Maheshwari, R., & Lin, M. C. (1999, June). Fast volume-preserving free form deformation using multi-level optimization. In Proceedings of the fifth ACM symposium on Solid modeling and applications (pp. 234-245).

[64] Hong, Q., Li, Y., Li, Q., Wang, B., Yao, J., Wu, Q., & She, Y. (2016). An implicit skeleton-based method for the geometry reconstruction of vasculatures. The Visual Computer, 32(10), 1251-1262.

[65] Hormann, K., & Floater, M. S. (2006). Mean value coordinates for arbitrary planar polygons. ACM Transactions on Graphics (TOG), 25(4), 1424-1441.

[66] Hornus, S., Angelidis, A., & Cani, M. P. (2003). Implicit modelling using subdivision-curves. Visual Computer, 19(2-3), 94-104.

[67] Hubert, E., & Cani, M. P. (2012). Convolution surfaces based on polygonal curve skeletons. Journal of Symbolic Computation, 47(6), 680-699.

[68] James, D. L., & Twigg, C. D. (2005). Skinning mesh animations. ACM Transactions on Graphics (TOG), 24(3), 399-407. 55

[69] Jiang L, Ye J, Sun L & Li J (2019). Transferring and fitting fixed-sized garments onto bodies of various dimensions and postures. Computer-Aided Design, 106, 30-42.

[70] Jin O Y, Lee T M, Lee I K (2018) Hierarchical Cloth Simulation using Deep Neural Networks. In Proceedings of Computer Graphics International 2018 (CGI 2018). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA,139146.

[71] Jones, B., Thuerey, N., Shinar, T., & Bargteil, A. W. (2016). Example-based plastic deformation of rigid bodies. ACM Transactions on Graphics (TOG), 35(4), 1-11.

[72] Joshi, P., Meyer, M., DeRose, T., Green, B., & Sanocki, T. (2007). Harmonic coordinates for character articulation. ACM Transactions on Graphics (TOG), 26(3), 71-es.

[73] Kang, Y. M., Choi, J. H., Cho, H. G., & Lee, D. H. (2001). An efficient animation of wrinkled cloth with approximate implicit integration. The Visual Computer, 17(3), 147-157.
[74] Kavan, L., & Žára, J. (2005, April). Spherical blend skinning: a real-time deformation of articulated models. In Proceedings of the 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games (pp. 9-16).
[75] Kavan, L., Collins, S., Žára, J., & O'Sullivan, C. (2008). Geometric skinning with approximate dual quaternion blending. ACM Transactions on Graphics (TOG), 27(4), 1-23.
[76] Kavan, L., Gerszewski, D., Bargteil, A. W., & Sloan, P. P. (2011). Physics-inspired upsampling for cloth simulation in games. In ACM SIGGRAPH 2011 papers (pp. 1-10).
[77] Kavan, L., McDonnell, R., Dobbyn, S., Žára, J., & O'Sullivan, C. (2007, April). Skinning arbitrary deformations. In Proceedings of the 2007 symposium on Interactive 3D graphics and games (pp. 53-60).
[78] Kavan, L., Sloan, P. P., & O'Sullivan, C. (2010, May). Fast and efficient skinning of animated meshes. In Computer Graphics Forum (Vol. 29, No. 2, pp. 327-336). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
[79] Kawabatra, S. (1980). " The Standardization and Analysis of Hand Evaluation". The Textile Machinery Society Japan.
[80] Kimmerle, S., Wacker, M., & Holzer, C. (2004). Multilayered Wrinkle Textures from Strain. In VMV (pp. 225-232).
[81] Kroyer, B. (1986). Animating with a Hierarchy. In Seminar on Advanced Computer Animation SIGGRAPH (Vol. 86).
[82] Kry, P. G., James, D. L., & Pai, D. K. (2002, July). Eigenskin: real time large deformation character skinning in hardware. In Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation (pp. 153-159).
[83] Kühnel, W. (2015). Differential geometry (Vol. 77). American Mathematical Soc..
[84] Lander, J. (1998). Skin them bones: Game programming for the web generation. Game Developer Magazine, 5(1), 10-18.
[85] Larboulette, C., & Cani, M. P. (2004, June). Real-Time Dynamic Wrinkles. In Proceedings of the Computer Graphics International (pp. 522-525).
[86] Lasseter, J. (1987, August). Principles of traditional animation applied to 3D computer animation. In Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 35-44).
[87] Lee Y, Ma J & Choi S (2013) Automatic pose-independent 3D garment fitting. Computers & graphics, 37(7), 911-922.
[88] Lewis, J. P., & Anjyo, K. I. (2010). Direct manipulation blendshapes. IEEE Computer Graphics and Applications, 30(4), 42-50.
[89] Lewis, J. P., Cordner, M., & Fong, N. (2000, July). Pose space deformation: a unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 165-172).
[90] Li J, Daviet G et al (2018) An implicit frictional contact solver for adaptive cloth simulation. ACM Trans. Graph. 37, 4, Article 52 (August 2018), 15 pages.
[91] Li J, Guodong L (2011)" Customizing 3D garments based on volumetric deformation." Computers in Industry 62.7:693-707.

[92] Li J, Lu G, Liu Z, Liu J and Wang X (2013) Feature curve-net-based three-dimensional garment customization. Textile Research Journal, 83(5), 519,531.
[93] Li J, Ye J, Wang Y, Bai L & Lu G (2010) Fitting 3D garment models onto individual human models. Computers & graphics, 34(6), 742-755.
[94] Li M, Sheffer A, Grinspun E, Vining N (2018) Foldsketch: enriching garments with physically reproducible folds. ACM Trans. Graph. 37, 4, Article 133 (August 2018), 13 pages.
[95] Liao, W., Liu, H., & Li, T. (2017). Interactive shape editing for subdivision surfaces. In Subdivision Surface Modeling Technology (pp. 197-216). Springer, Singapore.
[96] Liu, T., Bargteil, A. W., O'Brien, J. F., & Kavan, L. (2013). Fast simulation of mass-spring systems. ACM Transactions on Graphics (TOG), 32(6), 1-7.
[97] Loop, C. (1987). Smooth subdivision surfaces based on triangles. Master's thesis, University of Utah, Department of Mathematics.
[98] Loper, M., Mahmood, N., Romero, J., Pons-Moll, G., & Black, M. J. (2015). SMPL: A skinned multi-person linear model. ACM transactions on graphics (TOG), 34(6), 1-16.
[99] Macedo I, Joao P G, Luiz V (2011) Hermite radial basis functions implicits. Computer Graphics Forum. Vol. 30. No.1. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
[100] Magnenat-Thalmann, N., Cordier, F., Seo, H., & Papagianakis, G. (2004, November). Modeling of bodies and clothes for virtual environments. In 2004 International Conference on Cyberworlds (pp. 201-208). IEEE.
[101] Magnenat-Thalmann, N., Laperrire, R., & Thalmann, D. (1988). Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping. In In Proceedings on Graphics interface'88.
[102] MakeHuman. Open-source tool for making 3D characters [cited 2020]. Available from: http://www.makehumancommunity.org/
[103] Masuda, H., Yoshioka, Y., & Furukawa, Y. (2007). Preserving form features in interactive mesh deformation. Computer-Aided Design, 39(5), 361-368.
[104] McCormack J, Andrei S (1998)" Creating and rendering convolution surfaces. Computer Graphics Forum. Vol. 17.No. 2. Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishers.
[105] Meng, Y., Wang, C. C., & Jin, X. (2012). Flexible shape control for automatic resizing of apparel products. Computer-Aided Design, 44(1), 68-76
[106] Meyer, M., Desbrun, M., Schröder, P., & Barr, A. H. (2003). Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds. In Visualization and mathematics III (pp. 35-57). Springer, Berlin, Heidelberg.
[107] Miller, G. S. (1988, June). The motion dynamics of snakes and worms. In Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 169-173).
[108] Müller, M., & Chentanez, N. (2010, July). Wrinkle Meshes. In Symposium on Computer Animation (pp. 85-91).
[109] Pasko, G. I., Pasko, A. A., & Kunii, T. L. (2005). Bounded blending for function-based shape modeling. IEEE Computer Graphics & Applications, 25(2), 36-45.
[110] Peng G, Loretta R, David A H, Alexander W, & Michael J B (2012) DRAPE: DRessing Any PErson. ACM Trans.Graph. 31, 4, Article 35 (July 2012), 10 pages.
[111] Piegl, L., & Tiller, W. (2012). The NURBS Book. Springer Science & Business Media.

[112] Pinkall, U., & Polthier, K. (1993). Computing discrete minimal surfaces and their conjugates. Experimental mathematics, 2(1), 15-36.
[113] Pons-Moll, G., Pujades, S., Hu, S., & Black, M. J. (2017). ClothCap: Seamless 4D clothing capture and retargeting. ACM Transactions on Graphics (TOG), 36(4), 1-15.
[114] Popa, T., Zhou, Q., Bradley, D., Kraevoy, V., Fu, H., Sheffer, A., & Heidrich, W. (2009, April). Wrinkling captured garments using space-time data-driven deformation. In Computer Graphics Forum (Vol. 28, No. 2, pp. 427-435). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
[115] Provot, X. (1995, May). Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behaviour. In Graphics interface (pp. 147-147). Canadian Information Processing Society.
[116] Quarteroni, A., Sacco, R., & Saleri, F. (2010). Numerical mathematics (Vol. 37). Springer Science & Business Media.
[117] Rappoport, A., Sheffer, A., & Bercovier, M. (1996). Volume-preserving free-form solids. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2(1), 19-27.
[118] Rhee, T., Lewis, J. P., & Neumann, U. (2006, September). Real-time weighted pose-space deformation on the GPU. In Computer Graphics Forum (Vol. 25, No. 3, pp. 439-448). Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishing, Inc.
[119] Ricci A (1973) A constructive geometry for computer graphics. The Computer Journal, 16(2), 157-160.
[120] Rmillard O, G. Kry P (2013) Embedded thin shells for wrinkle simulation. ACM Trans. Graph. 32, 4, Article 50 (July2013), 8 pages.
[121] Rodriguez, O. (1840). Des lois geometriques qui regissent les desplacements d'un systeme solide dans l'espace et de la variation des coordonnees provenant de deplacements consideres independamment des causes qui peuvent les produire. J Mathematiques Pures Appliquees, 5, 380-440.
[122] Rohmer, D., Popa, T., Cani, M. P., Hahmann, S., & Sheffer, A. (2010). Animation wrinkling: augmenting coarse cloth simulations with realistic-looking wrinkles. ACM Transactions on Graphics (TOG), 29(6), 1-8.
[123] Rose, K., Sheffer, A., Wither, J., Cani, M. P., & Thibert, B. (2007, July). Developable surfaces from arbitrary sketched boundaries. In SGP'07-5th Eurographics Symposium on Geometry Processing (pp. 163-172). Eurographics Association.
[124] Santesteban I, Miguel A O, Dan C (2019) LearningBased Animation of Clothing for Virtual TryOn. Computer Graphics Forum. Vol. 38. No. 2. 2019.
[125] Sederberg, T. W., & Parry, S. R. (1986, August). Free-form deformation of solid geometric models. In Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 151-160).
[126] Shell, M. (2012). Carnegie mellon university motion capture database, (web site 2021) : https://ocap.cs.cmu.edu
[127] Sherstyuk, A. (1998). Convolution surfaces in computer graphics. Monash University.
[128] Shi, G., Gao, C., Wang, D., & Su, Z. (2021). Automatic 3D virtual fitting system based on skeleton driving. The Visual Computer, 37, 1075-1088.
[129] Shi, X., Zhou, K., Tong, Y., Desbrun, M., Bao, H., & Guo, B. (2007). Mesh puppetry: cascading optimization of mesh deformation with inverse kinematics. In ACM SIGGRAPH

2007 papers (pp. 81-es).

[130] Singh, K., & Fiume, E. (1998, July). Wires: a geometric deformation technique. In Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 405-414).

[131] Sloan, P. P. J., Rose III, C. F., & Cohen, M. F. (2001, March). Shape by example. In Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics (pp. 135-143).

[132] Sorkine, O. (2006, December). Differential representations for mesh processing. In Computer Graphics Forum (Vol. 25, No. 4, pp. 789-807). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

[133] Tangled film d'animation de Disney (***Site web 2021***): http://thewaltdisneycompany.com/

[134] The Matlab website. (***Site web 2021***) Available: www.mathworks.com

[135] Thiery, J. M., Guy, É., & Boubekeur, T. (2013). Sphere-meshes: Shape approximation using spherical quadric error metrics. ACM Transactions on Graphics (TOG), 32(6), 1-12.

[136] Thomaszewski, B., Pabst, S., & Strasser, W. (2009, April). Continuum-based strain limiting. In Computer Graphics Forum (Vol. 28, No. 2, pp. 569-576). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

[137] Tisserand Y, Cuel L & Magnenat-Thalmann N (2017) Automatic 3D garment positioning based on surface metric. Comput Anim Virtual Worlds. 28: e1770.

[138] Vaillant, R., Barthe, L., Guennebaud, G., Cani, M. P., Rohmer, D., Wyvill, B., ... & Paulin, M. (2013). Implicit skinning: Real-time skin deformation with contact modeling. ACM Transactions on Graphics (TOG), 32(4), 1-12.

[139] Vaillant, R., Guennebaud, G., Barthe, L., Wyvill, B., & Cani, M. P. (2014). Robust iso-surface tracking for interactive character skinning. ACM Transactions on Graphics (TOG), 33(6), 1-11.

[140] Wang H, Hecht F, Ramamoorthi R, F. OBrien J (2010). Example-based wrinkle synthesis for clothing animation. In ACM SIGGRAPH 2010 papers (SIGGRAPH 10). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 107, 18.

[141] Wang, C. C., & Tang, K. (2004). Achieving developability of a polygonal surface by minimum deformation: a study of global and local optimization approaches. The Visual Computer, 20(8), 521-539.

[142] Wang, C. C., Hui, K. C., & Tong, K. M. (2007). Volume parameterization for design automation of customized freeform products. IEEE transactions on automation science and engineering, 4(1), 11-21.

[143] Wang, X. C., & Phillips, C. (2002, July). Multi-weight enveloping: least-squares approximation techniques for skin animation. In Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation (pp. 129-138).

[144] Weber, O., Sorkine, O., Lipman, Y., & Gotsman, C. (2007, September). Context-aware skeletal shape deformation. In Computer Graphics Forum (Vol. 26, No. 3, pp. 265-274). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

[145] White K B, Cline D, Egbert P K (2007) Poisson Disk Point Sets by Hierarchical Dart Throwing. 2007 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing, Ulm, 2007, pp. 129-132.

[146] Wu N, Deng Z, Huang Y, Liu C, Zhang D & Jin X (2018) A fast garment fitting algorithm using skeleton-based error metric. Comput Anim Virtual Worlds.

[147] Wyvill, G., McPheeters, C. and Wyvill, B. Data structure forsoft objects. The Visual Computer 2, 227–234 (1986).

[148] Xu W, Umentani N, Chao Q, Mao J, Jin X, Tong X (2014) Sensitivity-optimized rigging for example-based real-time clothing synthesis. ACM Trans. Graph. 33, 4, Article 107 (July 2014), 11 pages.

[149] Xu, H., & Barbič, J. (2016). Pose-space subspace dynamics. ACM Transactions on Graphics (TOG), 35(4), 1-14.

[150] Wang, T. Y., Ceylan, D., Popovic, J., & Mitra, N. J. (2018). Learning a shared shape space for multimodal garment design. arXiv preprint arXiv:1806.11335.

[151] Yang, X. S., & Zhang, J. J. (2005, May). Realistic skeleton driven skin deformation. In International Conference on Computational Science and Its Applications (pp. 1109-1118). Springer, Berlin, Heidelberg.

[152] Ye, J., Ma, G., Jiang, L., Chen, L., Li, J., Xiong, G., ... & Tang, M. (2017, October). A unified cloth untangling framework through discrete collision detection. In Computer Graphics Forum (Vol. 36, No. 7, pp. 217-228).

[153] Yvart, A., Hahmann, S., & Bonneau, G. P. (2005). Hierarchical triangular splines. ACM Transactions on Graphics (TOG), 24(4), 1374-1391.

[154] Zanni, C., Bernhardt, A., Quiblier, M., & Cani, M. P. (2013). Surfaces Implicites Homothétiques. In Revue Electronique Francophone d'Informatique Graphique (Vol. 7, No. 1, pp. 41-52).

[155] Zhang D & Yuen M M (2000). Collision detection for clothed human animation. In Proceedings the Eighth Paciffic Conference on Computer Graphics and Applications (pp. 328-337). IEEE.

[156] Zhong, Y., & Xu, B. (2009). Three-dimensional garment dressing simulation. Textile Research Journal, 79(9), 792-803.

[157] Zhong Y. Q. (2008) Fast virtual garment dressing on posed human model. Journal of Fiber Bioengineering and Informatics, 1(1), 21-28.

[158] Zhou, K., Huang, J., Snyder, J., Liu, X., Bao, H., Guo, B., & Shum, H. Y. (2005). Large mesh deformation using the volumetric graph laplacian. In ACM SIGGRAPH 2005 Papers (pp. 496-503).

[159] Zorin, D. (2000). Subdivision for modeling and animation. SIGGRAPH2000 course notes.

[160] Zurdo, J. S., Brito, J. P., & Otaduy, M. A. (2012). Animating wrinkles by example on non-skinned cloth. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 19(1), 149-158.

[161] Ait Mouhou, A., Saaidi, A., Ben Yakhlef, M., & Abbad, K. (2021). 3D garment positioning using Hermite radial basis functions. Virtual Reality, 1-28.

Annexe A

Etude analytique des approches d'augmentation des plis sur un maillage de vêtement.

Nous présentons dans cette annexe une étude analytique des travaux dernièrement publiés dans le cadre des deux sous-catégories d'approches d'augmentation des plis [1]. Cette étude a pour objectif d'évaluer la capacité de chacune de ces approches à générer les plis sur des vêtements portés par des personnages virtuels ainsi que la mise en relief de leurs avantages et de leurs inconvénients.

A.1. Approches d'augmentation de plis

Dans cette partie, nous présentons les approches récemment proposées, dans le cadre des deux sous-catégories d'approches d'augmentation des plis.

A.1.1. Approches géométriques

Le principe de fonctionnement de cette catégorie d'approche est résumé sur la figure A.1.

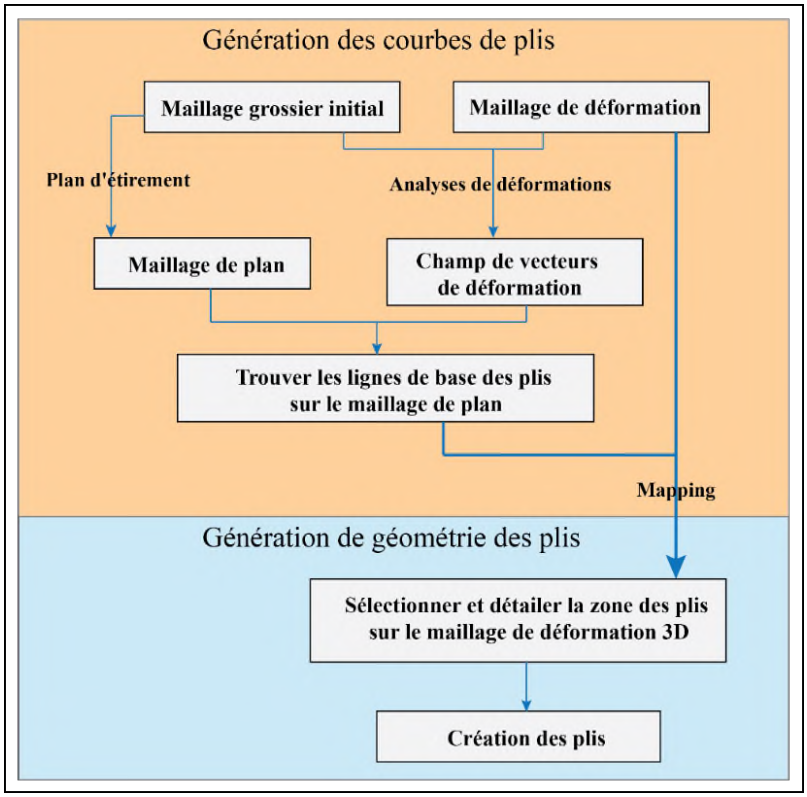


Figure A.1 : Principe de fonctionnement des méthodes d'augmentation géométrique.

Le tableau A.1, regroupe les modèles et les techniques d'augmentation géométrique, examinées dans ce travail.

Référence	Paramètres d'entrées	Étapes de modélisation et d'animation
Cutler et al. [49]	▪ Maillage de référence ▪ 10 à 12 poses de référence	1- Générer les courbes de plis manuellement avec un outil interactif 2- Convertir chaque courbe de plis en un ensemble de forces de déplacement qui agissent sur les points de surface du maillage. 3- Calculer les déformations des plis pour chaque trame sur une pose d'animation arbitraire.
Rohmer et al. [122]	▪ Maillage de référence ▪ Animation de vêtements lisse	1- Calculer le champ tensoriel lisse [Talpaert 2013], entre les trames d'animations et un maillage du vêtement comme référence. 2- Tracer les courbes de plis sur le maillage dans les zones qui présentent une compression élevée selon les résultats de l'étape précédente. 3- Générer la géométrie des plis en utilisant un déformeur implicite en squelette qui prend les courbes des plis comme squelette.
Gillette et al. [51]	▪ Maillage de référence	1- Construire un maillage triangulaire de référence pour chaque trame d'animation. 2- Calculer le champ tensoriel lisse entre chaque trame d'animations et le maillage de référence de la trame précédente. 3- Déterminer les patterns de mouvement sur la surface par une technique de *graph-cut* [Boykov 2001]. 4- Utiliser l'unité de tessellation GPU pour générer la géométrie des plis suivant les patterns de l'étape 3.

Tableau A.1 : Approches d'augmentations géométriques examinées dans cette étude.

A.1.2. Approches guidées par base de données (data-driven)

Une large gamme des méthodes d'augmentation de plis par base de données, ajout des plis au maillage de tissu en utilisant des informations obtenues à partir d'une base de données statique qui contient des simulations des échantillons de plis [140]. La figue A.2 ci-dessous, présente le principe de fonctionnement de cette catégorie d'approche.

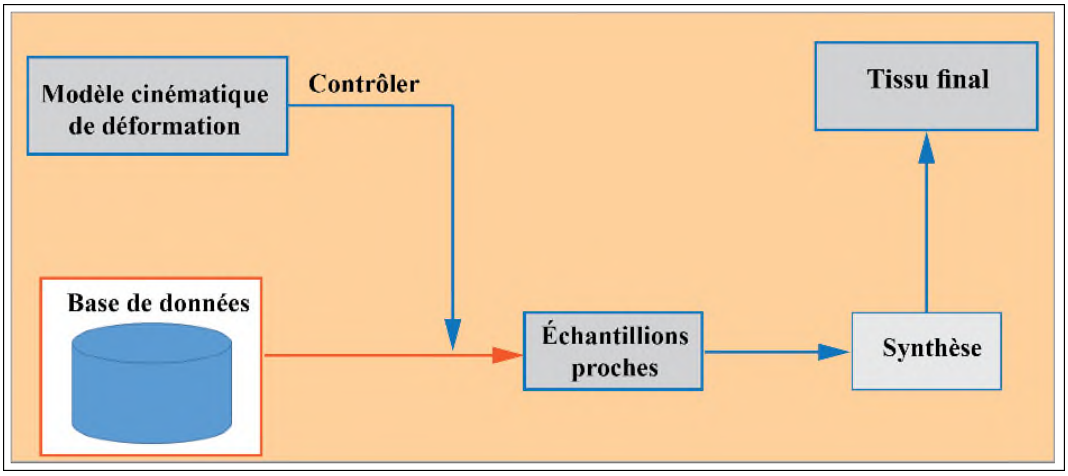


Figure A.2 : Principe de fonctionnement des méthodes *data-driven*.

Dans le tableau A.2 (ci-dessous), nous avons exposé les récentes approches proposées en *data-driven*. Selon les critères de paramètres d'entrée, technique de simulation utilisée pour construire la base de données et les étapes de modélisation et d'animation des plis pour chaque approche.

Référence	Paramètres d'entrées	Techniques de simulation des échantillons	Étapes de modélisation et animation
Wang et al. [140]	▪ Pose du caractère ▪ Maillage grossier du tissu.	Simulation multi-résolution	1. Prendre comme données d'entrée l'articulation du caractère humain. 2. Chercher les maillages de plis correspond à cette articulation dans la base de données précalculée. 3. Fusionner les maillages pour toutes les articulations en un seul maillage. 4. Transférer les détails des plis vers le maillage grossier du tissu.
Zurdo et al [160]	▪ Maillage caractéristique ▪ Nombre de fois de subdivision	Simulation multi-résolution + Déformation à base d'espace de pose	1. Simuler le tissu à faible résolution, défini par le maillage caractéristique. 2. Subdiviser le maillage à faible résolution pour obtenir le maillage lisse. 3. Appliquer le calcul des plis à base des échantillons pour obtenir le maillage détaillé.

Hahn et al. [59]	▪ Squelette rigide ▪ Maillage de surface non déformée ▪ Séquences d'animation	Simulation sous-espace	1. Rechercher dans la base de données, les vecteurs d'échantillon proche de la pose actuelle. 2. Sélectionner un ensemble de vecteurs depuis le groupe de base candidats de l'étape (1). 3. Effectuer la simulation en sous-espace en utilisant l'ensemble de vecteurs sélectionnées.
Xu et al. [148]	▪ Maillage du corps ▪ Maillage de vêtement ▪ Squelette articulé	Analyse de sensibilité	1. Chercher les poses d'échantillon les plus proches de la pose d'entrée. 2. Appliquer le schéma de rigging optimisé par sensibilité sur les échantillons récupérés. 3. Mélanger les déformations pour synthétiser le maillage intermédiaire. 4. Résoudre les pénétrations et ajouter les effets dynamiques et l'amortissement.

Tableau A.2 : Approches d'augmentations *data-driven* examinées dans cette étude.

A.2. Résultats de l'étude analytique

Cette étude analytique est fondée principalement sur les résultats obtenus de notre implémentation de quelques approches parmi les deux catégories. Ainsi sur les résultats des expériences publiées dans les articles des approches, et les démonstrations de simulation enregistrées dans les vidéos associées à chaque article.

A.2.1. Analyse de déformation

Dans cette partie, nous allons comparer les deux catégories d'approches d'augmentation au niveau de la capacité à simuler les plis quelle que soit la cause de déformation de tissu.

A.2.1.1. Augmentation géométrique

La méthode de [49] permet de concevoir les courbes de plis à l'aide d'un système basé sur un certain nombre de positions clés dessinées par un artiste. Dans les méthodes de [122, 51] l'analyse de déformation est effectuée par un calcul du champ tensoriel du maillage déformé par rapport à un maillage de référence (voir figure A.3).

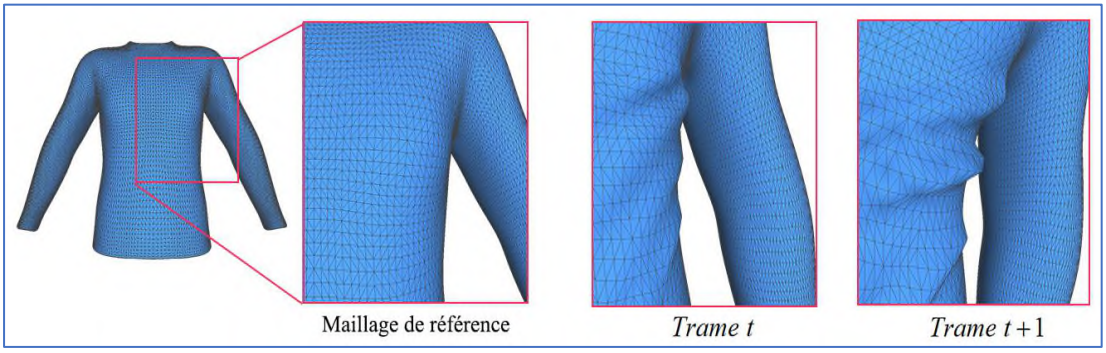


Figure A.3 : Le calcul de champ de tenseurs d'élongation utilise le même maillage de référence pour tous les trames d'animation.

A.2.1.2. Approches en data-driven

Les simulations en bas de la figure A.4, sont les résultats que nous avons obtenus à la fin de l'opération d'ajout des plis [59]. D'après ces simulations on remarque que le système étudié a réussi à affecter l'échantillon à son os correspond dans la déformation seulement pour deux poses d'animation parmi les trois poses traitées.

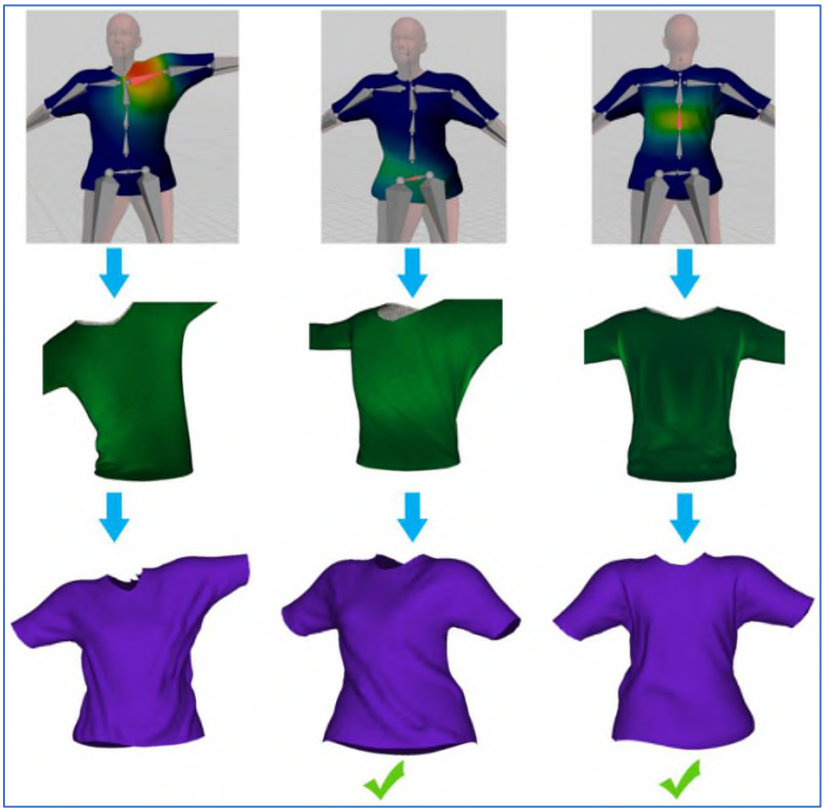


Figure A.4 : les plis générés par la méthode de [59] pour trois poses d'animation. (En haut) l'influence de l'os sur la partie. (Au centre) l'échantillon correspond à l'os dans la base des plis de [59]. (En bas) le résultat de simulation obtenu.

A.2.1.3. Comparaison au niveau d'analyse de déformation

Le tableau A.3 présente un résumé de la comparaison entre les approches au niveau de la modélisation des plis de compression ou d'étirement

Catégories	Approche (Auteur)	Modèle de détection de déformation	Type de déformation	Nature de vêtement
Géométriques	[49]	_	_	Serré
	[122]	Tenseurs d'élongation	Compression	Serré Bouffant
	[51]	Tenseurs d'élongation	Compression	Serré Bouffant
Data-driven	[140]	Squelette articulé	Compression	Serré
	[160]	Déformation Pose-Espace pondérée (WPSD)	Compression Étirement	Serré Bouffant
	[59]	Modèle de déformation cinématique (LBS)	Compression Étirement	Serré
	[148]	Squelette articulé	Compression	Serré

Tableau A.3 : Comparaison des techniques en termes de modèle de détection de déformation utilisé, type de déformation détectée, les vêtements supportés.

A.2.2. Forme des plis générés

D'une manière générale la forme des plis, c'est-à-dire leur largeur et leur profondeur, reflète à la fois la quantité de déformation appliquée sur la surface, l'épaisseur du tissu ainsi que sa structure interne.

A.2.2.1. Forme des plis des approches géométriques

Afin de contrôler l'apparence de la forme des plis, les méthodes de [122] et [51] représentent les plis comme un contour de cercle décalé par rapport à la surface du maillage, en définissant deux paramètres affectant leur largeur et leur profondeur.

La figure A.6 illustre les résultats obtenus avec différents paramètres de forme des plis [122]. Bien que l'utilisation d'arcs circulaires pour représenter les plis soit un choix adapté pour l'estimation de leur hauteur et leur largeur, les profils de plis réels s'écartent de cette forme. En effet les plis réels des vêtements se fondent en douceur avec la surface environnante de tissu.

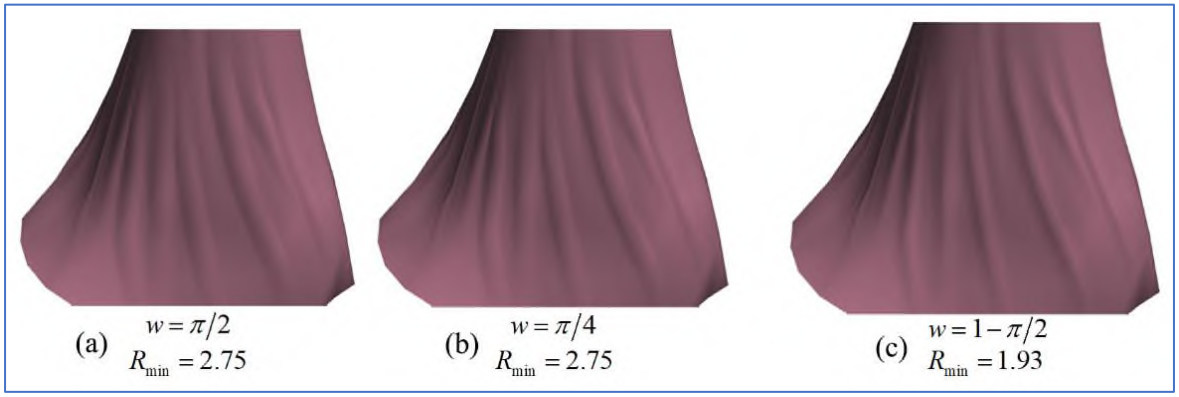


Figure A.6 : Résultats d'application de la méthode de [122] sur un modèle de jupe déformée. (a) et (b) déférentes largeurs d'arc de plis. (c) augmenter la résistance de tissu aux plis avec un arc semi-circulaire.

A.2.2.2. Forme des plis des approches en data-driven

Nous avons examiné la méthode de [59], en l'appliquant sur un modèle de t-shirt. Nous avons utilisé la même base des plis utilisé dans l'implémentation de [59]. La figure A.7 illustre les résultats de simulation. D'après les résultats de la simulation, on peut noter que les plis générés suivent une organisation parallèle, et ils ont presque la même forme.

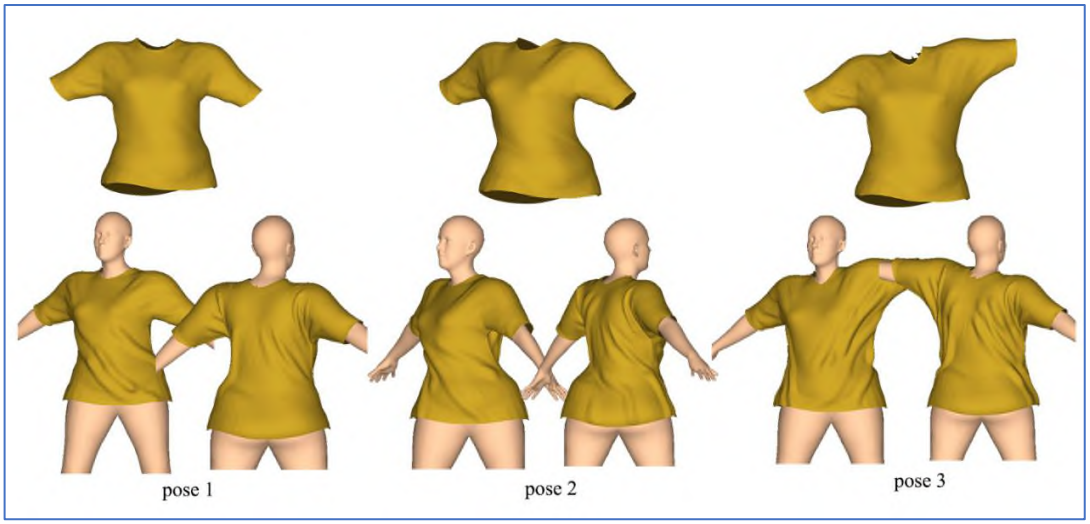


Figure A.7 : Résultat de simulation avec la méthode [59] de sur un modèle de T-shirt. (En haut) la déformation de modèle. (En bas) le résultat d'ajout de plis.

A.2.2.3. Comparaison au niveau de la forme des plis

D'après l'étude et les expérimentations que nous avons effectués sur les deux catégories d'approche d'augmentation de plis, nous pouvons conclure que :

- La méthode géométrique offre à l'artiste la possibilité de contrôler la hauteur et la densité des plis à l'aide d'un ensemble de paramètres d'entrée. Cependant, les plis générés ont

une forme généralement circulaire, ce qui loin de la forme réelle des plis (forme proche des B-spline quadratique).

- Les méthodes à base de données ne possèdent pas ce mécanisme qui permet de gérer les paramètres de la forme des plis. Leurs résultats dépendent des échantillons de plis stockés dans la base. Par conséquent, le contrôle direct de l'utilisateur semble impossible ; ainsi les caractéristiques naturelles de longueur, et largeur, dépendent forcément de l'étape de création de la base de plis.

A.2.3. Persistance temporelle

Dans ce paragraphe, nous allons montrer les méthodes proposées dans chaque approche dans le but de simuler la persistance temporelle des plis.

A.2.3.1. Persistance par approches géométriques

Les propositions de [122] et [51] détectent la déformation de la surface de tissu en chaque trame d'animation, par l'utilisation du calcul de tenseurs d'élongation entre le maillage déformé et le maillage de référence. Suite à cette étude, nous avons résumé les étapes de ce principe pour toute trame comme suit.

1. Déplacer les points générateurs en fonction des nouvelles valeurs de champs de tenseurs.
2. Propager les nouvelles courbes de plis suivant la compression des triangles du maillage.
3. Optimiser globalement les courbes tracés.

La figure A.8 présente le résultat de simulation de trois trames d'animation successive.

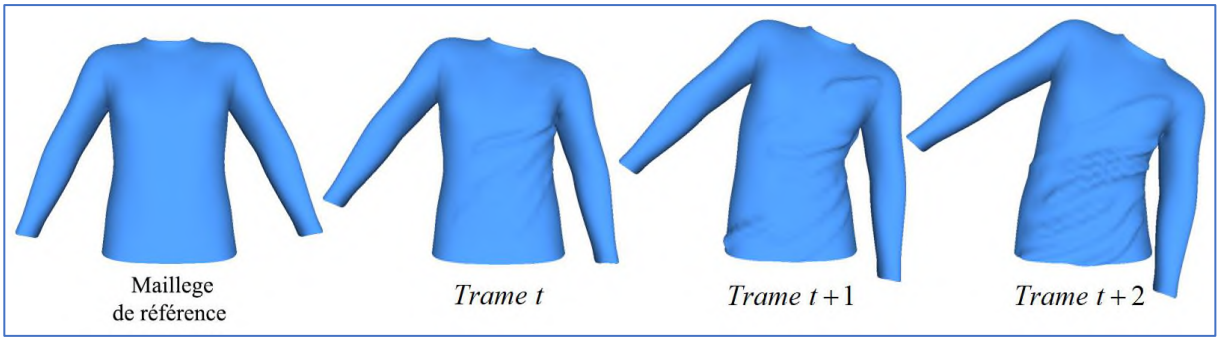


Figure A.8 : Résultats d'application de la méthode de [122] sur un modèle de t-shirt en animation.

A.2.3.2. Persistance par approches data-driven

Les méthodes de *data-driven* reposent principalement sur un modèle d'interpolation linéaire qui prend en considération la distribution des poids des articulations sur la surface de tissu et la position de l'articulation. La figure A.9 ci-dessous, présente les résultats de la simulation issus de la proposition de [140]. Ces résultats montrent que la forme finale d'un maillage de tissu, après l'utilisation de cette méthode Wang et al. [140], dépond des échantillons stockés dans la base.

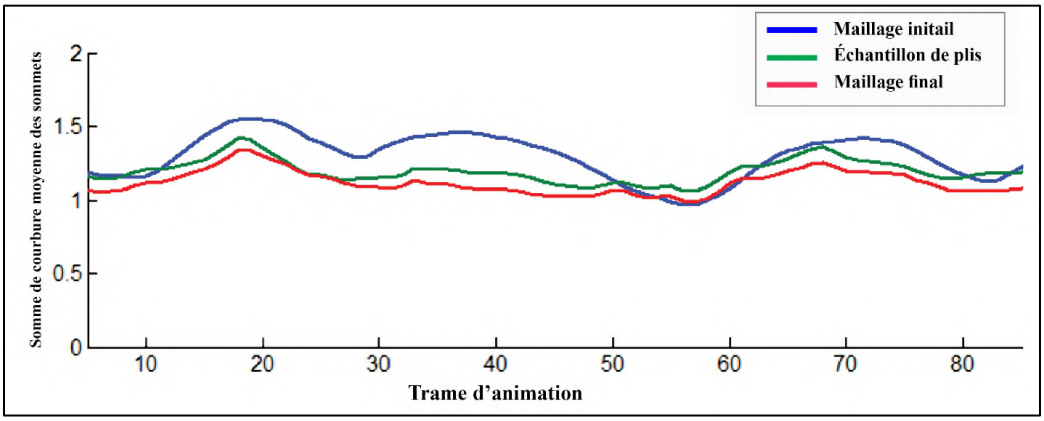


Figure A.9 : Comparaison de la somme de courbure moyenne des sommets sur 80 trames [140] pour le maillage d'entrée (bleu), maillage de base de plis(vert) et maillage final(rouge).

A.2.3.3. Comparaison au niveau de la persistance

Le tableau A.4, rassemble les avantages et les inconvénients des deux sous-catégories d'approches d'augmentation de plis au niveau de la persistance de plis.

Catégorie	Avantages	Inconvénients
Géométriques	▪ Plis synchronisent avec le mouvement de tissu	▪ Les plis apparaissent et disparaissent brusquement ▪ Le processus de glissement très sensible au changement de tenseurs d'élongation ▪ Absence de détails statiques sur le tissu
Data-driven	▪ Présence de détails statiques sur le tissu	▪ Déformation de frictions internes du tissu non-détectée ▪ Déformation de frictions entre les vêtements et la surface du corps non détecté ▪ La qualité des résultats dépend de la taille de base de données

Tableau A.4 : Avantages et Inconvénients des deux sous-catégories au niveau de la persistance des plis.

A.2.4. Parallélisme et performance en temps d'exécution

Le tableau A.5 présente un résumé de l'étude au niveau de l'aspect général des plis générés, la capacité d'implémentation en GPU et le temps moyenne d'exécution de l'approche.

Catégorie	Approche	Plis statiques	Plis dynamiques	Utilisation de GPU	Vitesse moyenne d'exécution (FPS)
Géométriques	[49]		✓		0.7 à 1.7
	[122]		✓		5 à 10
	[51]		✓	✓	60
Data-driven	[140]	✓			12
	[160]	✓		✓	125
	[59]		✓		17
	[148]	✓		✓	20

Tableau A.5 : Comparaison des techniques en termes de types de plis générés, implémentation en GPU et vitesse moyenne d'exécution.

A.3. Conclusion

Suite à l'étude analytique présentée dans cette annexe, nous avons conclu que la force des méthodes géométriques réside dans leur capacité de manipulation directe du maillage de tissu, et que la force des méthodes à base de données se situe dans l'utilisation des modèles de déformation liés au corps, pour guider le processus de récupération des déformations de plis, depuis la base.

Annexe B

Algorithme d'enrobage par mélange linéaire (Linear Blend Skinning)

Dans le skinning par mélange linéaire (LBS), l'opération de base consiste à déformer la peau selon une liste donnée de transformations osseuses (Fig. 3.2). La formulation du modèle LBS nécessite les données d'entrée suivantes :

- **Maillage de surface** : un modèle 3D représenté sous forme du maillage polygonal, où seules les positions des sommets changeront lors des déformations. Nous désignons les autres sommets de pose par $v_i ..., v_n$ et $v_i \in \mathbb{R}^4$ sont donnés en coordonnées homogènes.
- **Transformations de squelette** : représentant la déformation courante à l'aide d'une liste de matrices $T_i ..., T_m \in \mathbb{R}^{4\times4}$. Les matrices peuvent être définies de manière pratique à l'aide d'un squelette animé. Avec T_j est la matrice de transformation associée à l'os j dans sa pose actuelle (déformée), R_j^{-1} est la transformation inverse du même os dans la pose de repos R. De plus, la matrice R reste constante, donc son inverse est également constant et peut être précalculé en toute sécurité. Chaque transformation de squelette influence une partie du maillage.
- **Poids de skinning**: Pour chaque sommet v_i, nous avons des poids $w_{i,1} + ... + w_{i,m} \in \mathbb{R}$, dans lesquels chaque $w_{i,j}$ décrit le degré d'influence de l'os j sur le sommet v_i. Les poids de liaison sont normalement supposés être convexes, donc $w_{i,1} + ... + w_{i,m} = 1$ et $w_{i,j} \geq 0$.

Le maillage de surface est manipulé à l'aide de squelette. Chaque sommet est associé aux os via un poids de liaison, qui quantifie l'influence de chaque os sur les sommets. Par conséquent, l'idée de base derrière LBS est de mélanger linéairement les matrices de transformation. La peau est déformée en transformant chaque sommet par une combinaison pondérée de transformations de squelette dans la pose de repos. Ainsi, la position finale du sommet transformée v_i' est une moyenne pondérée de sa position initiale transformée par chacun des os associés au sommet. L'ensemble du processus peut être exprimé avec l'équation suivante.

$$v_i' = \sum_{j=1}^{m} w_{i,j} T_j R_j^{-1} v_i \qquad \text{(A.1)}$$

Techniquement, l'implémentation d'un algorithme de skinning par mélange linéaire est simple et un pseudo-code est présenté dans Algorithme B.1. Le skinning de mélange linéaire fonctionne très bien lorsque les transformations mélangées T_j ne sont pas très différentes. Des problèmes

surviennent si nous devons mélanger des transformations, qui diffèrent considérablement dans leurs composants de rotation.

Algorithme B.1 : Pseudo-code simple de l'algorithme de skinning par mélange linéaire

Entrée : *Vecteur sommets*, *Matrices 4x4 transformationSqueletteCurrent*, *Matrices 4x4 transformationSqueletteInitial*, *Matrices 4x4 poidsSkinning*

Sortie : *Vecteur sommetsDéformés*

1. *// Appliquer l'animation actuelle (transformation de squelette) à la pose initiale pour obtenir la // matrices de skinning.*
2. **Pour tout** *os* j **dans** *Squelette* **faire**
3. $matriceSkinning_j =$
   $transformationSqueletteCurrent \times transformationSqueletteInitial_j^{-1}$
4. **Fin pour**
5. *// Boucler sur chaque sommet et calculer la position fusionnée*
6. **Pour tout** v_i **dans** *sommet* **faire**
7. $sommetsDéformés_i = sommets_i + poidsSkinning_{i,j} \times matriceSkinning_j$
8. **Fin pour**

Annexe C

Enrobage par quaternions doubles (Dual Quaternions Skinning)

C.1. Quaternions

Les quaternions satisfont le besoin de méthodes complètes de représentation de l'orientation et offrent des avantages significatifs par rapport à la manière traditionnelle d'utiliser les angles d'Euler pour définir les orientations. De plus, les quaternions sont extrêmement utiles pour interpoler entre les orientations dans l'espace 3D. L'utilisation la plus répandue des quaternions à ce jour est dans l'animation par ordinateur. Ils sont utilisés pour représenter les transformations de l'orientation des objets graphiques.

La construction des quaternions est basée sur la théorie des nombres complexes. Un quaternion est défini comme :

$$q = w + (xi + yj + zk) \quad \text{(B.1)}$$

Avec w, x, y, z sont des nombres réels et i, j, k sont les composants imaginaires. Les composants imaginaires satisfont $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$, et ils ne sont pas communicatives. Le composant w est également connu comme la partie scalaire d'un quaternion, et x, y, z sont également connus sous le nom de partie vectorielle. Il est plus courant en infographie de représenter un quaternion comme ces deux composants :

$$q = (w, v) \quad \text{(B.2)}$$

Les opérations arithmétiques élémentaires des quaternions peuvent donc s'exprimer avec ces représentations comme ci-dessous :

- Multiplication scalaire :

$$sq = (sw, sv) \quad \text{(B.3)}$$

Avec s est un paramètre scalaire

- L'addition :

$$q_1 + q_2 = (w_1 + w_2, v_1 + v_2) \quad \text{(B.4)}$$

- La multiplication, est définie par le produit Hamilton :

$$q_1 q_2 = (w_1 w_2 - v_1 . v_2, w_1 v_2 + w_2 v_1 + (v_1 \times v_2)) \quad \text{(B.5)}$$

- Conjugué :

$$q^* = (w, -v) \quad \text{(B.6)}$$

- Ordre de grandeur :

$$\|q\| = \sqrt{qq^*} \quad \text{(B.7)}$$

Dans une rotation 3D, les transformations correspondent généralement à des quaternions unitaires. Le quaternion unitaire est un quaternion dont la longueur est égale à 1, qui peut être calculée en divisant chacune de ses composantes par la grandeur. La composante scalaire du quaternion unitaire représente la quantité de rotation qui se produira, et la partie vectorielle représente l'axe autour de la rotation.

C.2. Dual quaternions

Les quaternions doubles étendent les quaternions avec la théorie des nombres doubles introduite par [Clifford 1882]. Les nombres doubles se composent de deux éléments :

$$z = r + \varepsilon d \quad \text{(B.8)}$$

Avec l'élément ε est l'opérateur double avec $\varepsilon^2 = 0$ et $\varepsilon \neq 0$, r est la partie réelle (ou partie non-double) et d est la partie double.

Un quaternion dual a d'abord été présenté comme une algèbre de Clifford composée de deux quaternions [Clifford 1882], qui a non seulement une arithmétique élémentaire similaire aux quaternions qui représentent des rotations, mais il inclut également des informations sur la translation. Chaque quaternion dual se compose de deux quaternions, et ils sont distingués comme la partie réelle et la partie double selon la théorie des nombres double. Soient q_r la partie réelle et q_d la partie double, alors un quaternion double $\hat{q}$ est défini comme suit :

$$\hat{q} = q_r + q_d\varepsilon = \left(r_w, r_x, r_y, r_z\right) + \left(d_w, d_x, d_y, d_z\right)\varepsilon \quad \text{(B.9)}$$

Avec q_d est l'unité double, $\left(r_w, r_x, r_y, r_z\right)$ et $\left(d_w, d_x, d_y, d_z\right)$ sont respectivement la représentation en quaternion de la partie réelle et de la partie double.

Les opérations arithmétiques élémentaires des quaternions doubles peuvent donc s'exprimer avec ces représentations comme ci-dessous :

- Multiplication scalaire :

$$s\hat{q} = sq_r + sq_d\varepsilon \quad \text{(B.10)}$$

Avec s est un paramètre scalaire

- L'addition :

$$\hat{q}_1 + \hat{q}_2 = q_{r_1} + q_{r_2} + \left(q_{d_1} + q_{d_2}\right)\varepsilon \quad \text{(B.11)}$$

- La multiplication :

$$\hat{q}_1\hat{q}_2 = q_{r_1}q_{r_2} + \left(q_{r_1}q_{d_2} + q_{d_1}q_{r_2}\right)\varepsilon \quad \text{(B.12)}$$

- Conjugué :

$$\hat{q}^* = q_r^* + q_d^*\varepsilon \quad \text{(B.13)}$$

- Ordre de grandeur :

$$\|\hat{q}\| = \sqrt{\hat{q}\hat{q}^*} \qquad \text{(B.14)}$$

Les quaternions doubles unitaires peuvent également représenter des transformations 3D. Les transformations utilisant des quaternions doubles unitaires sont données comme suit :

$$p' = \hat{q}p\hat{q}^* \qquad \text{(B.15)}$$

Avec p et p' représentent le point de transformation dans l'espace 3D intégré dans un quaternion unitaire, et $\left(\hat{q}, \hat{q}^*\right)$ représentent un quaternion dual et son conjugué.

Les informations de rotation d'un quaternion double unitaire correspondent au quaternion de partie réelle q_r et le quaternion de partie double q_d représente les informations de translation. Étant donné un vecteur de translation $\vec{t} = \left(t_0, t_1, t_2\right)$ dans un espace tridimensionnel, les informations de translation sous la forme d'un quaternion unitaire sont données comme suit :

$$q_d = \left(0, \frac{t_0}{2}, \frac{t_1}{2}, \frac{t_2}{2}\right) \qquad \text{(B.16)}$$

Ainsi, une unité de quaternion double $\hat{q}$ sans rotation est représenté comme suit :

$$\hat{q} = \left(1, 0, 0, 0, 0, \frac{t_0}{2}, \frac{t_1}{2}, \frac{t_2}{2}\right) \qquad \text{(B.17)}$$

Rappelant la forme matricielle des quaternions unitaires, la forme matricielle d'un quaternion double unitaire est essentiellement un composé de la matrice de rotation qui correspond au quaternion unitaire de la partie réelle et au vecteur de translation. La forme de matrice de transformation homogène des quaternions doubles est donnée par :

$$\begin{bmatrix} r_w^2 + r_x^2 - r_y^2 - r_z^2 & 2r_x r_y - 2r_w r_z & 2r_x r_z + 2r_w r_y & t_0 \\ 2r_x r_y + 2r_w r_z & r_w^2 - r_x^2 + r_y^2 - r_z^2 & 2r_y r_z - 2r_w r_x & t_1 \\ 2r_x r_z - 2r_w r_y & 2r_y r_z + 2r_w r_y & r_w^2 - r_x^2 - r_y^2 + r_z^2 & t_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{(B.18)}$$

Publications

Articles publiés dans des journaux internationaux

1) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. "*3D garment positioning using Hermite radial basis functions.* " **Virtual Reality (Springer), 1-28.** DOI: https://doi.org/10.1007/s10055-021-00566-7
Facteur d'impact Scopus : 7.5 (2020)

2) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. " *Wrinkle synthesis for cloth mesh with hermite radial basis functions*". **Multimedia Tools and Applications (springer)**, 80(1), 1583-1610. August 2020, DOI : https://doi.org/10.1007/s11042-020-09743-3.
Facteur d'impact Scopus : 4.6 (2020)

3) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. *"Virtual Hand Skinning Using Volumetric Shape"*. **International Journal of Computer Aided Engineering and Technology (Inderscience)** 2020 En cours de publication.
Facteur d'impact dans Scopus : 0.6 (2020)

4) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. "*Analytical View of Augmenting Coarse Cloth Simulations with Wrinkles*" **Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer), vol 756.** May 2018
DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-319-91337-7_44
Facteur d'impact dans Scopus : 0.9 (2019)

Communications

1) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. "*Augmenting coarse Cloth simulation with Wrinkles: Comparative study*" **The second International Conference on Real-Time Intelligent Systemes (RTIS 2017).** 18-20 octobre 2017
   Bibliothèque universitaire Mohamed Sekkat, Université Hassan II, Casablanca, Maroc.

2) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. "*A study and implementation of the hand deformation using implicit skinning*" **International Conference on Intelligent Systems and Advanced Computing Sciences (ISACS) (pp. 1-7). IEEE.** 26-27 Décembre 2019
   Faculté Polydisciplinaire de Taza, Université Sidi Mohamed Ben Abdallah, Fès, Maroc.
   DOI : https://doi.org/10.1109/ISACS48493.2019.9068914

3) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. " *Cloth Fitting Based on Skeleton Driving and Implicit Skinning*". **2020 8th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM) (pp. 1-5). IEEE.** 28-29 Octobre 2020 (Virtual).
   Université de Reims Champagne-Ardenne Reims, France.
   DOI : https://doi.org/10.1109/WINCOM50532.2020.9272498

Résumé

Réaliser une déformation visuellement plausible d'un objet 3D, comme par exemple un modèle du corps humain et les vêtements, est une étape importante dans le processus d'animation, que ce soit pour des productions de jeux vidéo ou de films d'animation 3D. Parmi les méthodes les plus utilisées on trouve les déformations géométriques rapides telles que l'enrobage (skinning) et les méthodes physiques à basse résolution. Cependant, ces méthodes ne permettent pas de simuler certains aspects naturels et essentiels de la surface de l'objet. En particulier la préservation du volume du corps, l'effet du gonflement de la peau au niveau des articulations de la main virtuelle, le positionnement sans pénétrations d'un vêtement sur le corps d'un personnage, ou la création de plis sur la surface des vêtements portés par un personnage animé.

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le cadre de modélisation et déformation des modèles 3D. De nouvelles méthodes de déformation de tissu (vêtement et peau) ont été proposées. Ces méthodes permettent de rendre la surface des modèles plus active et réaliste, en modélisant un certain nombre de contraintes de la surface portant sur les caractéristiques du volume ou sur les détails intrinsèques de celle-ci.

Les principales contributions proposées dans cette thèse sont :

- Premièrement, nous avons proposé une nouvelle méthode de génération de plis pour des vêtements portés par un personnage. Nous avons utilisé pour cela une déformation du maillage du vêtement à l'aide d'une représentation implicite basée sur les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF). Le processus de génération de plis est effectué avec des courbes tracées dans les régions qui présentent une forte déformation du maillage.
- Deuxièmement, nous avons proposé une méthode de positionnement de vêtements sur des modèles de corps humain ayant différentes formes et postures. Cette méthode ne nécessite aucun modèle de référence et elle est basée sur l'idée d'établir une correspondance entre le corps humain et le maillage du vêtement. Cette correspondance est réalisée avec la déformation du vêtement basée sur l'approximation des fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF).
- Troisièmement, nous avons proposé une méthode de déformation implicite basée sur le suivi du maillage à l'aide des formes volumétriques. Cette contribution a pour objectif de surmonter les défauts de l'enrobage standard (LBS et DQS), en ajoutant une étape de post-traitement qui consiste à corriger les positions des sommets du maillage déformé. La correction des positions est effectuée à l'aide des formes volumétriques considérées comme guides de déformation.

Nos différentes approches ont été évaluées à l'aide des simulations détaillées avec différents modèles, scènes d'animation, et comparaisons avec d'autres méthodes. Les avantages de ces approches dans le domaine de modélisation et de déformation sont multiples et bien dégagés, et les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Mots clés : Simulation du vêtement, Positionnement du vêtement, Système d'essayage virtuel, Modélisation implicite, Déformation par squelette, Animation de personnages, Déformation implicite, Modélisation de plis.

Abstract

Performing a visually plausible deformation of a 3D object, such as a human body model and clothing, is an important step in the animation process, whether for video game productions or 3D animated movies. Among the most commonly used methods are geometric deformations such as skinning and low-resolution physical methods. However, these methods do not allow the simulation of some natural and essential aspects of the object surface. In particular, the preservation of body volume, the effect of skin swelling at the joints, the positioning without penetrations of a garment on the character's body, or the creation of wrinkles on the surface of clothing worn by an animated character.

The present work is related to the modeling and deformation of 3D objects. New methods of deformation of the fabric (clothing and skin) have been proposed. Our methods allow to make the surface of the models more active and realistic, by modeling a number of constraints of the surface in relation with the characteristics of the volume or the intrinsic details of the surface.

The main contributions proposed in this thesis are:

– First, we have proposed a new method for generating wrinkles for clothes worn by a character. For this purpose, we used a deformation of the mesh of the garment using an implicit representation based on Hermite radial basis functions (HRBF). The process of generating folds is performed with curves drawn in regions that exhibit high mesh deformation.
– Second, we have proposed a method for positioning garments on human body models with different shapes and postures. This method which doesn't require any reference model is based on the idea of establishing a correspondence between the human body and the garment mesh. This correspondence is performed with the deformation of the garment based on the Hermite Radial Basis Function approximation (HRBF).
– Third, we have proposed an implicit deformation method based on mesh tracking using volumetric shapes. This contribution aims at overcoming the shortcomings of the standard embedding (LBS and DQS), by adding a post-processing step that consists in correcting the positions of the vertices of the deformed mesh. The correction of the positions is performed using the volumetric shapes considered as deformation guides.

Our different approaches have been evaluated using detailed simulations with different models, animation scenes, and comparisons with other methods are accomplished. The advantages of these approaches in the field of modeling and deformation are multiple and well identified. Thus, the results obtained are very satisfactory.

Keywords: Garment simulation, Garment positioning, Virtual fitting system, Implicit modeling, Skeleton deformation, Character animation, Implicit deformation, Wrinkles modeling.

Table des matières

Résumé 1
Abstract 2
Table des matières 3
Liste des figures 6
Liste des tableaux 10
Liste des abréviations 11
Introduction générale 12
Chapitre 1 : État de l'art 18
1.1. Introduction 18
1.2. Modélisation par surfaces 18
1.2.1. Surfaces explicites 19
1.2.2. Surfaces implicites 27
1.3. Déformation physique 31
1.3.1. Modèle à masses-ressorts 31
1.3.2. Animation physique de vêtements 33
1.4. Déformations géométriques 34
1.4.1. Classification des méthodes géométriques 35
1.4.2. Déformations de l'espace 35
1.4.3. Déformation par enrobage (alias Skinning) 38
1.4.4. Déformations à base de modèles 47
1.4.5. Déformation directe de surfaces 50
1.5. Déformation sous contraintes 52
1.5.1. Contraintes de longueurs 53
1.5.2. Préservation de volume 61
1.6. Conclusion 63
Chapitre 2 : Nouvelle méthode de synthèse de plis sur un maillage de tissu à l'aide des fonctions à base radiale d'Hermite 64
2.1. Introduction 64
2.2. Principe général de l'approche d'ajout de plis 65
2.3. Déformation implicite de vêtements 67
2.3.1. Partitionnement du vêtement 67
2.3.2. Approximation du maillage de vêtement 69
2.3.3. Déformation de vêtements 78

2.4. Génération de plis 81
2.4.1. Préparation des champs d'angles 82
2.4.2. Génération des courbes de plis 83
2.4.3. Principe du mouvement des plis 86
2.4.4. Génération de la forme géométrique de plis 87
2.4.5. Projection des plis sur le maillage du vêtement 88
2.5. Résultats expérimentaux 91
2.5.1. Performances de calcul 91
2.5.2. Évaluation qualitative de la méthode d'ajout de plis 93
2.5.3. Comparaison et discussion 99
2.6. Conclusion 106
Chapitre 3 : Positionnement de vêtements 3D sur un corps humain à l'aide de squelette d'animation et des fonctions à base radiale d'Hermite 107
3.1. Introduction 107
3.2. Aperçu général sur la méthode de positionnement 108
3.3. Intégration du squelette dans les maillages 111
3.4. Alignement de la posture du vêtement avec celle du corps 112
3.4.1. Alignement des squelettes 113
3.4.2. Déformation de vêtement 115
3.5. Transfert de vêtement 116
3.5.1. Ajustement de l'orientation du vêtement 116
3.5.2. Gestion des pénétrations 119
3.5.3. Apparence du vêtement 120
3.6. Résultats et validation 121
3.6.1. Résultats des simulations 122
3.6.2. Comparaison avec les approches alternatives 128
3.7. Performances d'exécution 133
3.8. Conclusion 135
Chapitre 4 : Nouvelle méthode de déformation à base des formes volumétriques (DBVS) - Application au maillage de main virtuelle 136
4.1. Introduction 136
4.2. Calcul du poids d'enrobage 138
4.3. Principe général de la méthode DBVS 138
4.4. Déformation du maillage 141
4.4.1. Création de la forme volumétrique 141

4.4.2. Support compact de la forme volumétrique 144
4.4.3. Composition des fonctions de distance 146
4.4.4. Suivi du maillage 149
4.4.5. Algorithme de déplacement des sommets 152
4.5. Résultats de simulation 153
4.6. Performances de calcul 156
4.7. Paramètres du contrôle de la déformation 157
4.8. Comparaison de DBVS avec les méthodes alternatives 159
4.9. Conclusion 163
Conclusion générale 164
5. **Annexe A** 175
6. Annexe B 185
7. Annexe C 187

Liste des figures

Figure 1-1 : Modèle 3D d'un lapin ; (a) maillage triangulaire ; (b) le modèle affiché sur l'écran..... 19
Figure 1-2 : Exemple de transformation du plan 2D en surface 3D 20
Figure 1-3 : Exemple de surface définie par morceaux à partir d'un même domaine..... 22
Figure 1-4 : Différents exemples de courbes splines générées à partir des mêmes points de contrôle : (a)-spline d'interpolation ; (b)-B-spline ; (c)-spline cubique fermée ; (d)-B-spline cubique fermée 23
Figure 1-5 : Schéma de subdivision de Catmull-Clark 26
Figure 1-6 : Schéma de subdivision de Doo-Sabin 27
Figure 1-7 : Schéma de subdivision de Loop 27
Figure 1-8 : Exemple de squelette d'animation formé par une structure hiérarchiques de repères 38
Figure 1-9 : Exemple de déformation par enrobage lisse 40
Figure 1-10 : Exemple de l'effet de "collapsing elbow" indiqué par les cercles rouges 41
Figure 1-11 : Déformation d'un modèle de cylindre en utilisant méthode du LBS..... 42
Figure 1-12 : Exemple de correction de déformation LBS..... 43
Figure 1-13 : Résultats de déformation ; (a) Enrobage LBS ; (b) Enrobage par quaternions doubles 44
Figure 1-14 : Exemple du maillage du vêtement déformé en utilisant des repères non hiérarchiques..... 45
Figure 1-15 : Main virtuelle déformée par enrobage avec une distribution des poids non appropriés..... 46
Figure 1-16 : Illustration de diffusion de poids d'enrobage par équation de la chaleur sur un cylindre ; Exemple issu de la proposition de [16] 47
Figure 1-17 : Résultats de méthode d'apprentissage proposée par [151] appliquée sur des caractères animés 49
Figure 1-18 : Exemple de processus de subdivision du maillage polygonal..... 51
Figure 1-19 : Illustration de déformation basée sur les coordonnées différentielles [132] 52
Figure 1-20 : Modèles de vêtements virtuels utilisés en production cinématographique et jeux vidéo ; (À gauche) image issue de film d'animation Tangled [133] ; (À droite) image issue de jeu vidéo Assassin's Creed Syndicate [159] 53
Figure 1-21 : Transformation d'une courbe dans le plan en courbe dans la surface de vêtement 54
Figure 1-22 : Simulation quasi inextensible de deux modèles de vêtements [52] 57
Figure 1-23 : Simulation de vêtements à l'aide de frottement coulombien exact [90] 58
Figure 1-24 : Déformation par optimisation d'un modèle de jupe [33]..... 59
Figure 1-25 : Plis simulés sur deux modèles de vêtement ; (a) Exemple issu de [40] ; (b) Exemple issu de [80] 60
Figure 1-26 : Exemple de courbe de plis dessinés manuellement sur la surface du vêtement [39]..... 61
Figure 1-27 : Exemple de préservation de volume par déformation Laplacienne volumique [158] 62
Figure 2-1 : Principe de la méthode d'ajout de plis à un vêtement porté par un personnage animé ; (a) partitionnement du maillage ; (b) l'approximation HRBF ; (c) déformation du maillage 66
Figure 2-2 : Partitionnement de modèles de vêtements ; (a) Maillages avec squelette ; (b) les partitions des maillages résultants 68
Figure 2-3 : Exemple d'approximation en HRBF du maillage de pantalon..... 69
Figure 2-4 : Distribution de point de contrôle sur la surface d'un partie i du maillage 70
Figure 2-5 : Tracé de la fonction de re-paramétrisation 72
Figure 2-6 : Approximation des segments de vêtements ; (a) champs de potentiel HRBF ; (b) surfaces implicites résultantes 73

Figure 2-7 : Remplissage des trous laissés par l'étape de partitionnement ; (a) point de contrôle supplémentaire en bleu ; (b) la surface implicite finale reconstruite 74
Figure 2-8 : Calcul de l'angle α à partir de l'angle entre les os associés aux champs. 75
Figure 2-9 : Coupe transversale du champ généré par la composition des deux champs constituants la partie de genou ; (a) et (c) le résultat de composition avec l'opérateur d'union ; (b) le résultat de composition avec l'opérateur de mélange lisse 77
Figure 2-10 : Exemple de déformation de trois modèles de vêtement ; (a) positionnement de squelette d'animation ; (b) Le champ potentiel global obtenu après la transformation ; (c) la déformation de vêtement 79
Figure 2-11 : Exemple de correction des positions de sommet effectuée à l'aide du processus de suivi .. 80
Figure 2-12 : Exemple de relaxation tangentielle 81
Figure 2-13 : Exemple des angles de gradient dans l'intersection de deux champs HRBF 83
Figure 2-14 : (a) en rouge l'intersection des deux champs ; (b) en bleu les courbes de plis ; en vert les points de départ de traçage des courbes 84
Figure 2-15 : Principe du mouvement de courbe de plis ; La courbes vert et bleu sont respectivement les courbe de plis à l'instant précédente et courante ; Le point rouge représente un exemple de mouvement de point générateur 87
Figure 2-16 : Plis générés ; (a) maillage du vêtement déformé ; (b) maillage après l'étape de projection ; (c) zoom sur les plis ajoutés 89
Figure 2-17 : Maillage final obtenu à la fin d'application du lissage 90
Figure 2-18 : Résultats de plissement de deux modèles serrés portés par un personnage pendant deux poses d'animation 94
Figure 2-19 : Résultat d'ajout de plis sur un modèle de robe ; (a) modèle initial ; (b) modèle déformé ; (c) maillage avec des plis et (d) Modèle final 95
Figure 2-20 : Résultats d'ajout de plis pour un modèle de pantalon avec (a) $\tau = 0.8$ et (b) $\tau = 0.4$ 96
Figure 2-21 : Résultats d'ajout de plis pour un modèle de pantalon avec (a) $\gamma = 75$ et (b) $\gamma = 117$ 97
Figure 2-22 : Résultats d'ajout de plis sur trois résolutions d'un modèle de chemise ample ; Les statistiques représentent respectivement ; les sommets et les faces du maillage de chaque chemise 98
Figure 2-23 : Résultat d'animation d'un vêtement porté par un personnage pendant trois trames d'animation. 99
Figure 2-24 : Comparaison de nos résultats (a) avec deux méthodes de simulation physique (b) [108] et (c) [90] 102
Figure 2-25 : Comparaison avec la méthode de [55] ; (a) Résultats de [55] ; (b) Résultats de simulation avec la méthode d'ajout de plis 103
Figure 2-26 : Comparaison entre la méthode d'ajout de plis (a) et la méthode basée sur des croquis de Wang et al. [150] (b) 104
Figure 2-27 : Comparaison avec les méthodes d'augmentation géométrique ; (a) proposition de [122] ; (b) proposition de [51] 105
Figure 2-28 : Comparaison de la simulation d'ajout de plis(a) avec les résultats des approches en data-driven (b) [59] ; (c) [140] 106
Figure 3-1:Pipeline de la méthode du positionnement. 109
Figure 3-2: (a) Squelette intégré avec l'approche [16] ; (b) L'extraction de points caractéristiques (vert), puis l'ajout de points supplémentaires comme jointures (bleu) ; (c) le squelette conçu en joignant automatiquement ces points ; (d) le squelette résultant 112

Figure 3-3 : (a) corps ciblé ; (b) vêtement déformé ; (c) alignement sans ajustement de l'orientation. (d) alignement après l'ajustement de l'orientation 117
Figure 3-4 : Articulations utilisées pour le processus d'orientation ; (a) pour le corps ; (b) pour le vêtement déformé 118
Figure 3-5 : Exemple de traitement de la pénétration ; (a) modèle avec des pénétrations ; (b) modèle après la correction des pénétrations 119
Figure 3-6 : Modèle final après l'application du processus de synthèse des plis 121
Figure 3-7 : Ajustement de vêtements sur trois corps humains ayant des poids différents 123
Figure 3-8 : Positionnement de deux modèles de vêtements sur sept corps humains ayant des tailles différentes 124
Figure 3-9 : Positionnement de différents types de vêtements sur un même corps 124
Figure 3-10 : Positionnement de vêtements sur un même corps en différentes postures 125
Figure 3-11 : Résultats de positionnement de deux modèles de vêtements ayant des résolutions différentes sur un même corps 126
Figure 3-12 : Résultats de l'ajustement d'un modèle de t-shirt sur trois corps humains scannés différents issus de [9] 127
Figure 3-13 : Résultats du transfert de quatre modèles de chemises ayant une taille différente sur un même corps 128
Figure 3-14 : Comparaison des résultats de la déformation du vêtement en utilisant le tétraédral de proposition de [93] (a) ; et l'approximation HRBF (b) 132
Figure 3-15 : Comparaison en termes de traitement des auto collisions entre la méthode standard basée sur l'enrobage [55] (a) et nos résultats (b) 133
Figure 4-1 : Principe général de la méthode de déformation basée sur des formes volumétriques 140
Figure 4-2 : Principe de construction des parties de la forme volumétrique 142
Figure 4-3 : Principe de calcul de la distance d'un sommet v par rapport à la forme volumétrique 143
Figure 4-4 : Principe de support de surface implicite ; (a) primitive à support compact ; (b) primitive à support global 145
Figure 4-5 : Compositions effectuées à une paire de primitives implicites formant une articulation ; (a) avec l'opérateur d'union ; (b-c) mélange basé sur le gradient avec différentes valeurs de α 147
Figure 4-6 : Tracé des gradients de fonction de distance pour une articulation ; (a) les gradients colinéaires à l'extérieur de l'articulation ; (b) position où les gradients ne sont pas colinéaires 149
Figure 4-7 : (a) Surface du maillage présentant un motif en dents de scie ; (b) maillage après l'application du lissage Laplacien 151
Figure 4-8 : Configuration d'entrée ; (a) squelette d'animation ; (b) poids d'enrobage ; (c) partitionnement du maillage 153
Figure 4-9 : (a) Définition des sphères au niveau des articulation de squelette d'animation ; (b) représentation volumétrique résultante 154
Figure 4-10 : Composition des segments de main lors de la déformation est effectuée sans introduire de lacunes ; (a) maillage initial ; (b) maillage déformé 155
Figure 4-11 : Déformation d'index avec différentes compositions des formes volumétriques ; (a) en utilisant l'opérateur union ; (b) avec l'opérateur basé sur le gradient ; (c) en utilisant un poids de mélange 156
Figure 4-12 : Index déformé avec différentes valeurs du seuil R 158

Figure 4-13 : Impact du choix des paramètres θ_1 et θ_2 sur le renflement des muscles lors de la déformation..... 159
Figure 4-14 : Comparaison de DBVS avec la méthode DQS ; (a) déformation avec DQS ; (b) déformation avec DBVS ; Le cercle rouge montre les régions améliorées par DBVS..... 160
Figure 4-15 : Comparaison des résultats de déformation avec (a) LBS ; (b) Dual-quaternion ; (c) DBVS ; Le cercle rouge montre les régions de contact ciblées par l'amélioration..... 161
Figure 4-16 : Comparaison de la déformation DBVS avec HRBF au niveau de la forme du maillage 162
Figure 4-17 : Comparaison de DBVS avec HRBF au niveau de l'alignement de surfaces 163

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Avantages et inconvénients de la représentation par surfaces splines 24
Tableau 1-2 : Avantages et inconvénients des surfaces implicites 28
Tableau 1-3 : Avantages et inconvénients des surfaces de convolution 30
Tableau 1-4 : Avantages et inconvénients des approches physiques de déformation 31
Tableau 1-5 : Avantages et inconvénients de l'approches déformation par masses-ressorts 33
Tableau 1-6 : Avantages et inconvénients de l'approches déformation par enrobage lisse 40
Tableau 2-1 : Temps d'exécution des principales étapes de la méthode de synthèse de plis 92
Tableau 2-2 : Comparaison avec les méthodes similaires récemment publiées en termes d'exigence d'entrée, modèles de vêtements supportés et le contrôle de la direction des plis 100
Tableau 2-3 : Comparaison avec des méthodes similaires 101
Tableau 3-1 : Comparaison avec des méthodes alternatives au niveau de données d'entrée ; posture du corps et type de vêtement 129
Tableau 3-2 : Comparaison avec des méthodes alternatives au niveau de déformation, gestion des pénétrations et préservation de caractéristiques du vêtement 130
Tableau 3-3 : statistiques de temps d'exécution (en seconde) pour certaines simulations présentées dans le présent chapitre 134
Tableau 4-1 : Temps d'exécution de l'approche de DBVS en comparaison avec l'approche d'HRBF [138] et l'approche de DQS 157

Liste des abréviations

NURBS	Non-uniform rational basis spline
FFD	Free form deformation
HRBF	Hermite Radial Basis Function
RBF	Radial Basis Function
LBS	Linear blend skinning
SSD	Sub-space deformation
GPU	Graphics Processing Unit
DQS	Dual Quaternion Skinning
CAO	Conception Assistée par Ordinateur.
FPM	Fast Projection Method
MCD	Motion Capture Database
GarNet	Garment Network
DOF	Degree of Freedom
SMPL	Skinned Multi-Person Linear
SCAPE	Shape Completion and Animation of People
DBVS	Deformation Based on Volumetric Shapes
MVC	Mean Value Coordinates

Introduction générale

Contexte de la thèse

Au cours de ces dernières décennies, les personnages virtuels sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne. Après avoir envahi les domaines du jeu vidéo et des films d'animation, on les retrouve maintenant peuplés des mondes virtuels où sont immergés des utilisateurs réels. Cependant, ces activités nécessitent des modèles de personnages et objets de synthèse plus réalistes. La difficulté est variable selon le type de personnages que l'on cherche à modéliser. En effet, il est délicat de rendre un personnage imaginaire crédible aux yeux de l'utilisateur, l'œil humain étant entraîné à voir de réels effets et percevant directement les moindres défauts dans le modèle virtuel. Afin de donner l'impression d'un monde virtuel convaincant, la manière dont se déforment les personnages et modèles virtuels est d'une importance capitale dans le processus de production des personnages 3D. Bien qu'on parle d'une réalité virtuelle, ces personnages doivent être *plausibles*, c'est-à-dire que leurs déformations doivent être naturelles et comporter les mêmes effets que les animations réalistes.

Le pipeline standard adopté par les studios professionnels pour la réalisation des personnages 3D, peut-être divisé en trois étapes distinctes, chacune était généralement réalisé par différentes méthodes :

- Phase de **modélisation :** le personnage virtuel est sculpté comme un objet statique dans une pose neutre et stockée sous la forme d'un ensemble de sommets connectés entre eux, pour former un maillage dont les faces sont triangulaires ou quadrangulaires.
- Phase de **déformation** : dans cette étape les utilisateurs augmentent la surface statique avec une série de fonctions géométriques qui transforment des parties entières de la surface du personnage. Ces fonctions de déformation utilisent des paramètres d'entrées pour contrôler le résultat de déformation.
- Phase **d'animation** : dans cette étape le personnage virtuel prend vie, à l'aide d'application d'un ensemble d'étape de déformation sur le maillage du personnage. Ces étapes sont positionnées par l'artiste dans un ordre chronologique.

Les étapes de modélisation, de déformation et d'animation impliquent toutes un effort manuel important qui implique plusieurs tâches fastidieuses, mais cruciales pour réaliser une animation

finale qui correspond exactement à ce que le réalisateur envisageait. Il est par conséquent nécessaire de développer des outils professionnels d'éditions 3D, qui à la fois facilitent les différentes tâches de production et produisent des modèles virtuels crédibles.

Le sujet de ce mémoire est au cœur d'application pour de nombreux domaines d'industrie du loisir, parmi lesquelles nous pouvons citer :

Jeux vidéo : les jeux en générale sont des alternatives de divertissement pour vivre des moments de récréation, quelles que soient nos quêtes. Dans les années 80, les jeux vidéo ont fait leur apparition, et depuis, ils présentaient un très grand secteur industriel qui génère un revenu très important. Au jourd'hui, les jeux vidéo en 3D occupent la première place des jeux vidéo utilisés par le grand public. Afin de répondre aux différents désirs des joueurs, les producteurs de jeux vidéo n'ont pas cessé de proposer de nouveaux produits, des univers variés, de nouvelles interfaces et des nouvelles possibilités d'interactivité. Cela à engendrer un dynamisme dans la recherche des nouvelles méthodes pour le développement et la création des modèles et des scènes en 3D pour les jeux vidéo.

Productions cinématographiques 3D : les films de synthèse 3D de nos jours ont connu une progression majeure au niveau de la quantité et la qualité des réalisations. En exploitant les techniques et les outils les plus récents de modélisation et animation, les films d'animation 3D ont concurrencé l'industrie du dessin animé traditionnel en matière de temps et coûts de fabrication. Face à cette utilisation de plus en plus importante des techniques d'animation 3D dans les productions cinématographiques d'aujourd'hui, l'amélioration des méthodes et techniques utilisées dans le processus de création des films d'animation en 3D est devenue un champ de recherche très important dans l'informatique graphique.

Réalité virtuelle : permet de simuler la présence d'un utilisateur dans un environnement artificiel généré en 3D. Les réalités virtuelles créent un environnement avec lequel l'utilisateur peut interagir. Il peut s'agir d'une reproduction du monde réel ou bien d'un univers totalement imaginaire. Ce domaine nécessite un taux de réalisme plus élevé que dans le cas des deux précédents domaines d'application que nous avons cités, c'est pour cela que sujets de recherches orientés vers ce domaine sont consacrés principalement à augmenter le taux de réalisme des modèles et personnages 3D utilisés.

Dans le cadre de cette thèse, nous souhaitons apporter des solutions au niveau de la déformation de personnages virtuels et en particulier en améliorant le réalisme par l'ajout de détails. Dans ce contexte, nous soulevons deux problématiques : Premièrement, les personnages 3D doivent revêtir une apparence réaliste lors de la déformation, à la fois au niveau d'aspect vestimentaire et au niveau de la déformation de ses articulations. Deuxièmement, les artistes numériques qui génèrent ces personnages doivent pouvoir les manipuler interactivement, et ce, de manière intuitive.

Problématique

Notre vision humaine du réalisme est particulièrement sensible à l'apparence et à la manière dont les objets se déforment. Tout défaut par rapport à un comportement attendu par l'œil, nous donnera l'impression que le modèle entier est anormal.

La déformation des différents modèles 3D jeu un rôle très important dans le processus de la production d'une scène d'animation virtuelle convaincante. L'importance capitale ici est de donner une apparence plausible aux modèles visuels. Par conséquent, afin que les déformations visuelles soient jugées satisfaisantes pour le grand public, il est indispensable de respecter certaines contraintes pour chaque catégorie du modèle 3D. Par exemple, un vêtement virtuel qui se déforme doit également engendrer des plis sur sa surface, une main virtuelle doit être animée sans avoir du gonflement exagéré au niveau des articulations.

Les techniques et outils professionnels les plus récents de production 3D ne fournissent cependant pas de méthodes de déformation automatiques et satisfaisantes pour la gestion des contraintes géométriques de modèles 3D. De ce fait, les artistes numériques sont obligés d'ajuster et de modifier manuellement les simulations avec différents paramètres, afin de se rapprocher des résultats visuels souhaités. Par conséquent, l'investissement en temps-machine et l'exigence des qualités artistiques pour la manipulation manuelle de paramètres rendent souvent l'utilisation de ces outils 3D fastidieuse. À l'heure actuelle, la réalisation de quelques secondes d'animation d'une production cinématographique 3D, peuvent être effectué en plusieurs jours de travail intensif par un artistes expérimentés.

Motivation

Dans le présent travail nous présentons différentes méthodes qui vont faciliter la tâche de modélisation et de déformation de surfaces 3D. Nos méthodes permettent d'ajouter des effets qui augmentent le réalisme du modèle 3D, ou d'exagérer un certain aspect de déformation dans le cas de manipulation des articulations d'un personnage 3D par exemple. Nous définissons des approches procédurales qui respectent les critères suivants :

- **Crédibilité** : Les méthodes décrites dans le présent travail permettent de générer des surfaces 3D plus crédibles par rapport à une modélisation ou une déformation classique. Dans nos propositions, on s'intéresse plus à la crédibilité des résultats de la déformation plutôt que à la précision numérique de la résolution des contraintes.
- **Contrôle et utilisabilité** : Nos méthodes assurent un degré de contrôle d'utilisateur sur le résultat visuel d'une déformation géométrique. En effet, il est souhaitable que les artistes ajustent la forme finale du modèle, ou la position de certaines déformations afin d'aboutir au résultat souhaité. Les méthodes que nous avons proposées peuvent être ajoutées comme des couches supplémentaires dans les outils professionnels, sans demander à l'utilisateur de modifier ces outils et sans alourdir le temps de calcul.
- **Efficacité :** Les approches décrites peuvent être utilisées comme post-traitement sur n'importe quel système de production du modèle 3D. La déformation et l'animation des modèles virtuels sont effectuées à vitesse interactive sur des machines standard utilisées généralement par le grand public.

Contributions

Nos contributions s'articulent autour de deux axes principaux.

Le premier axe de contributions se concentre sur la déformation rapide et le fait de rendre réaliste les vêtements d'un personnage. Premièrement, nous avons introduit une nouvelle méthode géométrique pour ajouter des plis sur des animations de vêtements [23]. La principale nouveauté de ce travail est l'utilisation des fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF) pour préciser la position et la direction des plis sur le maillage du vêtement. Contrairement aux approches existantes, cette méthode ne requière pas de base de données de plis ni de traçage manuel pour la localisation ou l'orientation de ces plis. Deuxièmement, nous avons proposé un nouveau système permettant d'adapter un vêtement donné à un corps humain cible ayant des formes et des postures diverses. La principale nouveauté de cette méthode est l'utilisation de fonctions de base radiale

d'Hermite pour approximer et déformer le maillage du vêtement, afin d'adapter la posture du corps humain cible. Après la déformation du vêtement, nous éliminons les interpénétrations potentielles entre le modèle humain et le vêtement en utilisant un algorithme de gestion des collisions.

Le second axe de contributions s'articule autour d'une nouvelle méthode de déformation d'une main virtuelle habillée d'une peau géométrique. Cette méthode permet la préservation de volume au niveau des articulations, et peut s'appliquée en temps réel sur une animation de main virtuelle. Cette méthode présente une nouvelle idée qui utilise l'approximation en formes volumétriques comme nouvelle représentation géométrique pour mieux contrôler le comportement de la peau virtuelle lors de la déformation. Cette méthode vise généralement la correction des effets indésirables introduits par les techniques standard de déformation comme le LBS ou dual quaternions [4].

Organisation du manuscrit

Ce manuscrit, composé de quatre chapitres, est organisé comme suit :

Le premier chapitre présente un état de l'art des différentes méthodes de modélisation et de déformation des surfaces 3D en mouvement. Nous détaillons les différentes méthodes de représentation de surfaces 3D. Ensuite nous présentons deux approches standard de déformation : approches physiques et géométriques. Enfin, nous passerons en revue les approches alternatives de déformation qui préservent certaines contraintes intrinsèques telles que le volume ou les longueurs en exposant leurs avantages et limites.

Le deuxième chapitre est consacré à notre première contribution proposée pour la synthèse de plis sur un maillage de vêtement porté par un personnage virtuel en mouvement. Nous explicitons la méthode de déformation du maillage de vêtement en utilisant une approximation à l'aide de surface implicite basée sur les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF). Nous détaillons ensuite la méthode de génération de plis basée sur le traçage des courbes de plis dans les régions qui présentent une forte déformation du maillage.

Le troisième chapitre présente notre deuxième contribution concernant la méthode de positionnement du vêtement sur un modèle humain 3D. Cette méthode est basée sur l'idée d'établir une correspondance entre la posture du vêtement et celle du modèle humain 3D. Afin

d'assurer cette correspondance, nous déformons le maillage du vêtement à l'aide du squelette d'animation et l'approximation en fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF).

Le quatrième chapitre décrit notre troisième contribution concernant l'animation du maillage associé à un squelette d'animation. Nous considérons en particulier le cas de la déformation d'une main virtuelle. Nous présentons une nouvelle méthode de déformation implicite basée sur le suivi du maillage. Cette contribution a pour objectif de surmonter les défauts de l'enrobage standard (LBS et DQS), en ajoutant une étape de post-traitement qui permet de corriger les positions des sommets du maillage déformé. La correction des positions est effectuée à l'aide des formes volumétriques considérées comme guides de déformation.

Les annexes présentent, d'une part, les résultats de l'étude analytique de deux catégories d'approches d'augmentation de plis sur le maillage du vêtement [1], et d'autre part les algorithmes d'enrobage standard (LBS et DQS).

La conclusion générale résume les quatre chapitres du travail de recherche et conclut par une présentation des perspectives.

Chapitre 1

État de l’arts

1.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous allons présenter quelques définitions et méthodes de deux étapes primordiales pour la manipulation des modèles 3D à savoir la modélisation et la déformation. La modélisation par surface est une représentation essentielle en animation. Il faut noter que le choix de méthode de modélisation d’une surface a des impacts sur la manipulation des objets 3D. Par conséquent, il est indispensable de considérer des méthodes de représentation et de déformations adéquates afin de pouvoir les manipuler efficacement et aisément.

Nous détaillerons premièrement les méthodes de modélisation par surface. Ensuite nous présenterons un état d’art des différentes approches de déformations de surfaces. Dans ce qui suit, nous expliquerons en détails les avantages et les inconvénients de chaque méthode de déformation. Nous abordons ensuite les travaux antérieurs réalisés dans le cadre de la déformation avec préservation de propriétés intrinsèques des surfaces particulières, comme les vêtements et la peau.

1.2. Modélisation par surfaces

Une surface est une structure utilisée pour représenter l'enveloppe géométrique d'un objet virtuel 3D. La surface définit donc la frontière physique d’un objet dans l’espace, et contient les propriétés fondamentales de sa forme. Une fois la surface est définie, il reste important de considérer d’autres paramètres sur cette forme, comme la couleur et les textures, afin d’obtenir un résultat visuel plausible. Dans la suite, nous présentons deux catégories de surfaces couramment utilisées dans la modélisation 3D : les surfaces explicites et les surfaces implicites. Chaque catégorie possède ses caractéristiques propres qui influencent son application. Le choix du modèle géométrique joue un rôle très important lors de la détection de collisions entre plusieurs modèles 3D ou entre différentes parties d'un même modèle, ainsi que lors de son affichage à l'écran.

1.2.1. Surfaces explicites

Un objet 3D dans la plupart des cas est défini par une surface complexe, qui est en général difficile à représenter avec une expression mathématique simple. D'où la nécessité de trouver un moyen d'approcher les formes complexes. Les surfaces explicites sont une solution pour modéliser un objet 3D par des modèles discrets. Elles consistent principalement à préciser d'une manière explicite l'ensemble des points de l'espace qui définissent la forme de l'objet 3D.

1.2.1.1. Surfaces polygonales

Les surfaces polygonales [46] permettent d'approximer une surface 3D à l'aide de primitives géométriques planes, le plus souvent des triangles ou des quadrilatères. La représentation est appelée maillage, qui est défini par un ensemble de polygones planaires appelés facettes. Les sommets de ces facettes sont le plus souvent positionnés dans un repère cartésien afin de définir la géométrie du maillage, tandis que la liaison d'adjacence entre sommets, appelée arêtes, définit la topologie de la surface 3D. La représentation d'un objet 3D par maillage triangulaire est la forme la plus simple qui est directement affichable par une carte graphique. Cette rapidité d'affichage rend ce type de représentation plus efficace pour l'utiliser dans le cas des jeux vidéo. La figure 1.1 illustre un exemple de modèle 3D composé d'un ensemble de facettes.

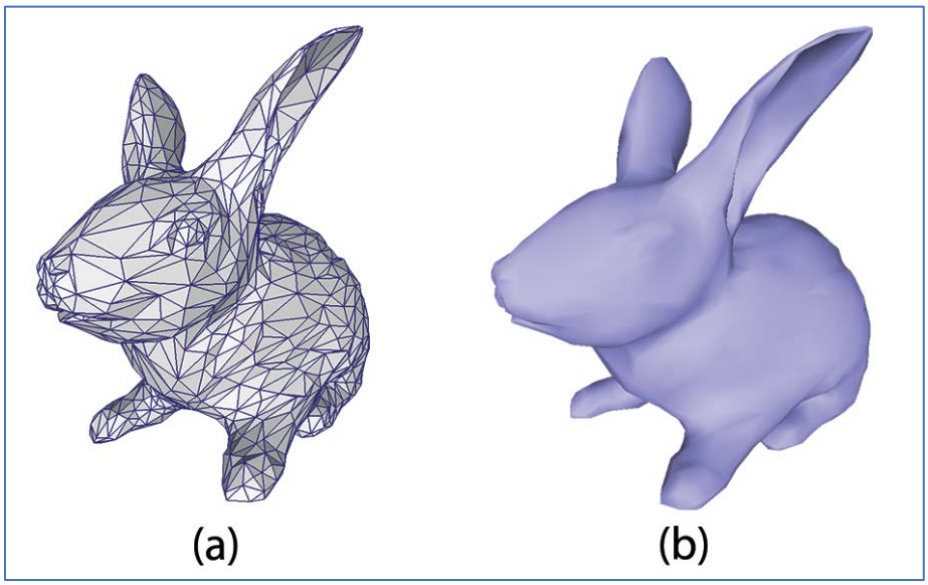


Figure 1-1 : Modèle 3D d'un lapin ; (a) maillage triangulaire ; (b) le modèle affiché sur l'écran

Quoique cette représentation soit rapide lors de l'affichage à l'écran, elle n'est pas la plus pratique à utiliser au cours des étapes de modélisation ou d'animation. En effet, la déformation d'un objet

3D nécessite la manipulation directe des sommets constituants son maillage. Plusieurs outils de modélisation ont été proposés pour alléger l'action de l'animation en lui donnant plus de gestion native des maillages polygonaux. D'avantages détails sur les caractéristiques spécifiques de cette représentation sont disponibles dans [2, 23].

1.2.1.2. Surfaces paramétriques

À l'inverse de la représentation en maillages polygonaux, les surfaces paramétriques sont les plus utilisées en modélisation car elles offrent un outil de dessin pratique et génèrent des surfaces beaucoup plus lisses que celles produites à l'aide des maillages polygonaux.

Une surface paramétrique S dans sa globalité est définie en exprimant l'ensemble des positions par lesquelles elle passe. Soit $P \subset \mathbb{R}^2$ un plan associé à un système de coordonnées (x, y) paramétrant ce domaine. Soit l'application g définie par :

$$g \begin{cases} P \subset \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}^3 \\ (x, y) \to g(x, y) \end{cases} \qquad (1.1)$$

La surface S peut donc être vue comme le résultat de la déformation d'un plan $P \subset \mathbb{R}^2$ en un sous-ensemble de $\mathbb{R}^3$ (figure 1.2).

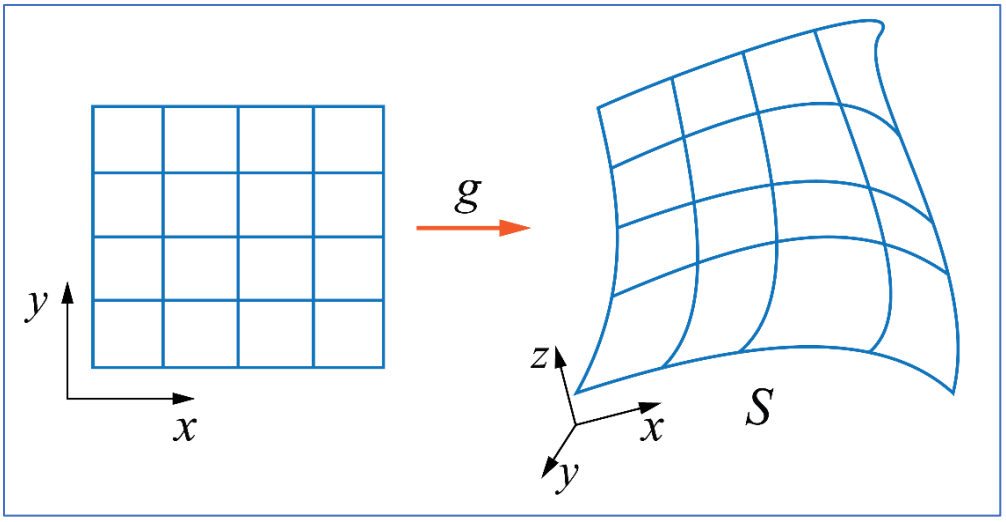


Figure 1-2 : Exemple de transformation du plan 2D en surface 3D

La fonction g contient les informations d'une paramétrisation globale définie par (x, y). Bien qu'il soit fréquent de confondre la fonction g avec la surface S, les deux ne sont pas équivalentes. Plus précisément, la surface S constitue la trace de la fonction g dans $\mathbb{R}^3$. La

connaissance de g implique celle de S, mais l'inverse étant fausse, et de plus la fonction g n'est pas unique pour une surface donnée.

Comme nous l'avons vu, la fonction g contient plus d'informations qu'une simple structure géométrique de la surface à modéliser, elle encode une paramétrisation globale de l'objet 3D. Cependant et dans la plupart des cas, cette paramétrisation est difficile à formuler par des fonctions mathématiques usuelles. Le principe d'usage de la représentation à l'aide de surfaces paramétriques en informatique graphique consiste à juxtaposer des parties des surfaces, dites "Patchs", afin de modéliser la forme globale de l'objet. C'est-à-dire que la position et les paramètres de continuités de la surface ne sont pas connus exactement que dans quelques points de la surface, le reste étant comblé par interpolation ou approximation. Alors la surface est définie par morceaux et non plus globalement. Nous détaillons par la suite différentes méthodes permettant de définir une surface complète par morceaux.

1.2.1.2.1. Modélisation par morceaux

En générale, une modélisation paramétrique par morceaux d'une surface S consiste à utiliser un nombre n (nombre de morceaux) de fonctions g_i défini sur des domaines P_i d'une manière que l'union respective de leurs surface s_i dans l'espace représente la surface globale $S = \bigcup s_i$ de l'objet 3D avec $i \in [1, n]$.

Une telle composition par morceaux assure un traitement local des caractéristiques de la surface 3D, ce qui rend la modélisation plus aisée. Dans la majorité des cas, définir exactement une surface donnée à l'aide d'un nombre fini de morceaux est très difficile voire impossible à cause de l'aspect complexe des surfaces 3D. Mais il est possible d'approcher le degré d'approximation de celle-ci avec une erreur centrée. Un bon choix de modélisation permet dans certains cas de faire converger un modèle discret vers la surface complexe lorsque le nombre de morceaux utilisés tend vers l'infini.

Dans l'intention de rendre encore la tâche de modélisation plus aisée, il est pratique de définir les fonctions de paramétrage sur un même domaine (triangulaire ou quadrangulaire) indépendamment du patch utilisé. Plus précisément, la surface 3D finale est obtenue par la composition des "patchs" initialement identiques dans le plan mais déformés séparément comme illustré sur la figure 1.3. Généralement, les patchs les plus utilisés pour la construction d'une

surface 3D sont ; les "patchs" splines bien qu'il en existe d'autres, comme "patchs" de Bézier [44] ou encore NURBS [111]. Nous allons tout d'abord définir les courbe splines (cas 1D) en détaillant leur fonctionnement, les différents types et leurs équations, avant d'étendre ces résultats au cas des surfaces paramétriques 3D.

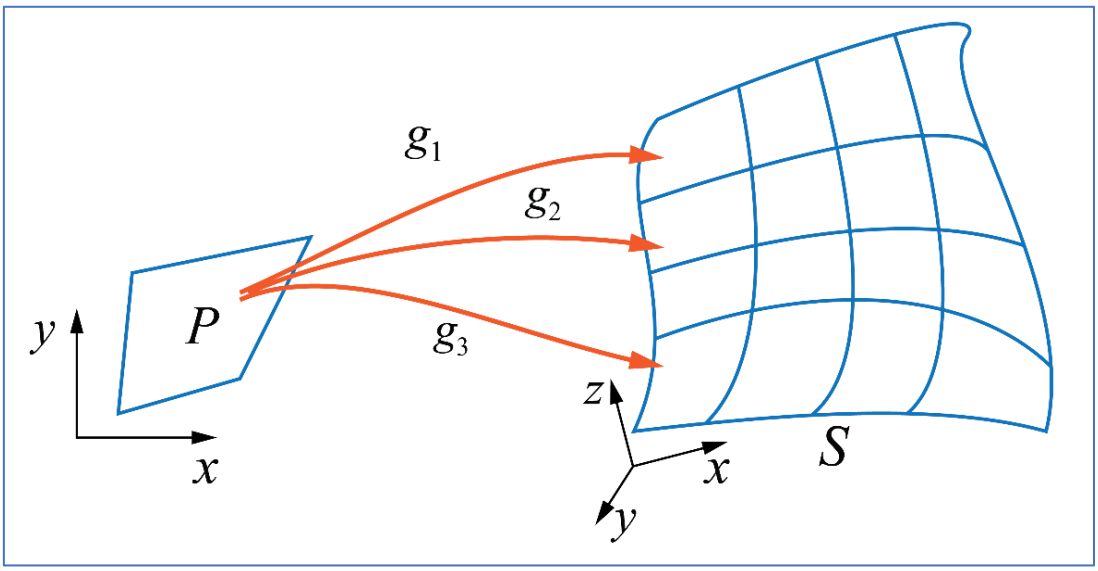


Figure 1-3 : Exemple de surface définie par morceaux à partir d'un même domaine

▪ Courbes splines

Une spline est une courbe représentée à l'aide de points de contrôle. Par exemple, le B-spline cubique est une fonction qui dépend d'un nombre défini de points, et qui permettent de générer une courbe polynomiale par morceaux à laquelle on assure certaines conditions de continuité au niveau des extrémités des portions de courbe. Chaque portion de courbe polynomiale est définie par un nombre fini de points de contrôle, ce qui fait que la déformation locale de la courbe est toujours assurée. Il existe de nombreux types de splines, à savoir, les splines d'interpolation et les splines d'approximation.

- Dans le cas de splines d'interpolation, la courbe passe par des points de contrôle et les segments cubiques générés se recollent en assurant une continuité C^1 en chaque point. Des exemples de ces splines sont illustrés sur la figure 1.4.
- Dans le cas des splines d'approximation, la courbe ne passe pas par les points de contrôle mais elle est englobée par le polygone formé par ces points. Ce type de courbe peut être utilisée comme atout efficace pour la détection des collisions. Les B-splines cubiques

uniformes illustrés sur la figure 1.4 sont la forme la plus simple des splines d'approximation.

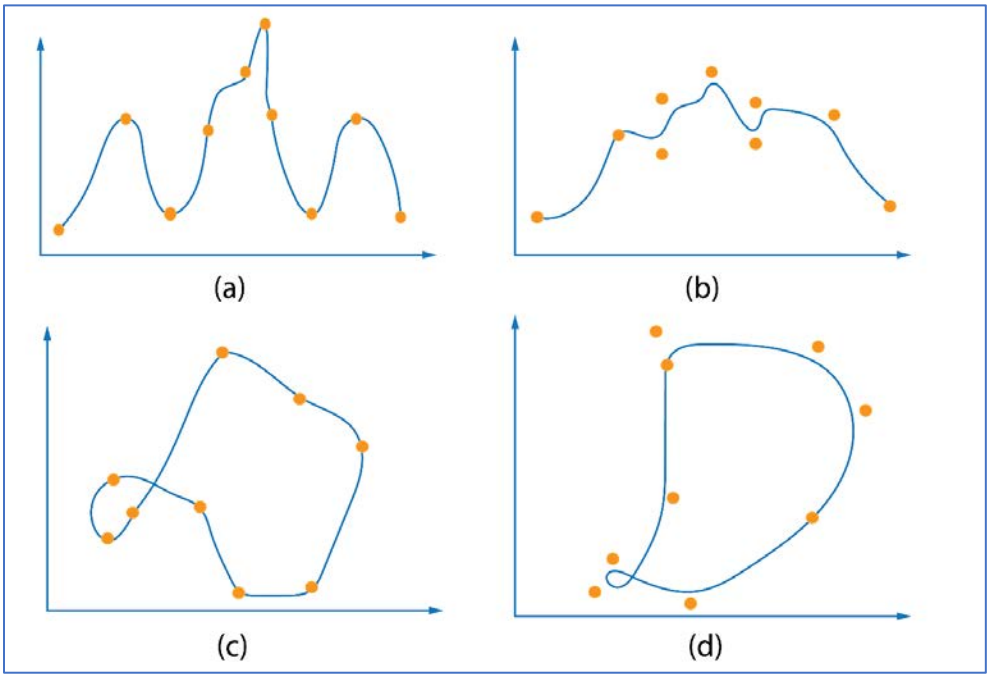


Figure 1-4 : Différents exemples de courbes splines générées à partir des mêmes points de contrôle : (a)-spline d'interpolation ; (b)-B-spline ; (c)-spline cubique fermée ; (d)-B-spline cubique fermée

- ## Surfaces splines

Les courbes splines peuvent être étendues à des surfaces splines bi-paramétriques qui permettent de créer des surfaces 3D. En effet, ceci est effectué avec l'extension des courbes par augmentation de la dimension de l'espace paramétrique. Le morceau de surface est alors l'équivalent d'une portion de courbe d'une spline simple. Le fonctionnement des surfaces splines reste le même pour les courbes, sauf que le domaine paramétrique est en 2D et le résultat de l'interpolation est une surface 3D.

Dans l'informatique graphique, les surfaces paramétriques sont devenues un standard pour représenter des surfaces lisses de géométrie complexe. En particulier, les outils professionnels tels que Autodesk Maya [14] ou Autodesk 3DS Max [13] utilisent des surfaces NURBS. Dans le tableau 1.1, nous avons résumé les avantages et les inconvénients de cette représentation.

Avantage	Inconvénient
– La formulation mathématiques définissant l'enveloppe est toujours la même pour toutes le formes d'objet (sphère, cylindre, formes libres …). – Le rendu se fait rapidement, par des algorithmes stables et efficaces de conversion en triangles. – Les NURBS sont invariantes aux transformations affines et perspectives ; elles sont une généralisation des B-splines non rationnelles et des surfaces de Bézier. – L'utilisation de points de contrôle permet à l'utilisateur de juger le résultat produit.	– La modélisation d'un objet complexe nécessite un grand nombre de points de contrôle, ce qui constitue un obstacle pour un utilisateur non expérimenté. – Le manque de souplesse lors de l'ajouts de détails à une surface préexistante. – Le raccordement des surfaces pose beaucoup de problèmes, par exemple, dans le cas de deux surfaces avec un nombre de patchs diffèrent. – L'utilisation d'une surface paramétrique peut aussi poser des problèmes au niveau de la détection de collisions, notamment lors de l'animation.

Tableau 1-1 : Avantages et inconvénients de la représentation par surfaces splines

Pour résoudre ce problème, les splines de topologie ont été proposées par Forsey et al. [48] puis généralisées par Gonzalez-Ochoa et al [53]. Dans ce même cadre, Yvart et al. [153] proposent une approche hiérarchique s'adaptant sur des splines à support triangulaire.

1.2.1.3. Surfaces de subdivision

Les surfaces de subdivision [11, 95] sont des surfaces paramétriques lisses définies comme le résultat d'un processus récursif de manipulation effectué à l'aide d'un schéma de subdivision. Ce schéma peut être caractérisé par le type de polygones utilisés dans le maillage de base (triangles ou quadrangles). Le processus de subdivision agit sur le maillage de base en subdivisant les polygones, dans chaque étape, la subdivision est faite en calculant les positions des nouveaux sommets créés et celles des anciens sommets de façon à ce que la surface résultante soit lisse. Les surfaces de subdivision permettent de créer des surfaces avec topologie quelconque, ce qui représente un avantage par rapport à des surfaces paramétriques, et le branchement des surfaces

ne posent aucun problème. Ainsi elles présentent un avantage au niveau de la simplicité d'implémentation, et dans le fait que les schémas de subdivision peuvent s'appliquer sur des maillages avec une topologie arbitraire, en plus, la continuité de la surface peut être contrôlée localement. Bien une telle surface de subdivisions ne dispose pas d'expression analytique directe, elle est très avantageuse au niveau de la déformation puisque l'on peut ne déformer que le maillage grossier.

Les schémas de subdivision les plus utilisés dans le domaine de la modélisation 3D sont : le schéma de Catmull-Clark [13], Doo-Sabin [42] et Charles Loop [97].

a) Schéma de subdivision de Catmull-Clark

C'est un schéma introduit par, il s'agit d'un algorithme d'approximation qui s'applique au maillage polygonal quelconque, la subdivision est procédée comme suit :

- Pour chaque facette du maillage, on insère un nouveau sommet de face, qui représente le barycentre des sommets originaux de la facette (Figure 1.5 (b)).
- Pour chaque arête du maillage, on insère un nouveau point appelé point d'arête, obtenu en moyennant les centres de l'arête et les sommets de face des deux facettes partageant cette arête (Figure 1.5 (c)).
- Actualiser les positions des sommets de polygone (Figure 1.5 (d)), tout en prenant en compte les nouveaux sommets et les points précédemment ajoutés.
- Enfin, le maillage final est généré en reliant les sommets comme il est illustré sur la figure 1.6 (e) ci-après.

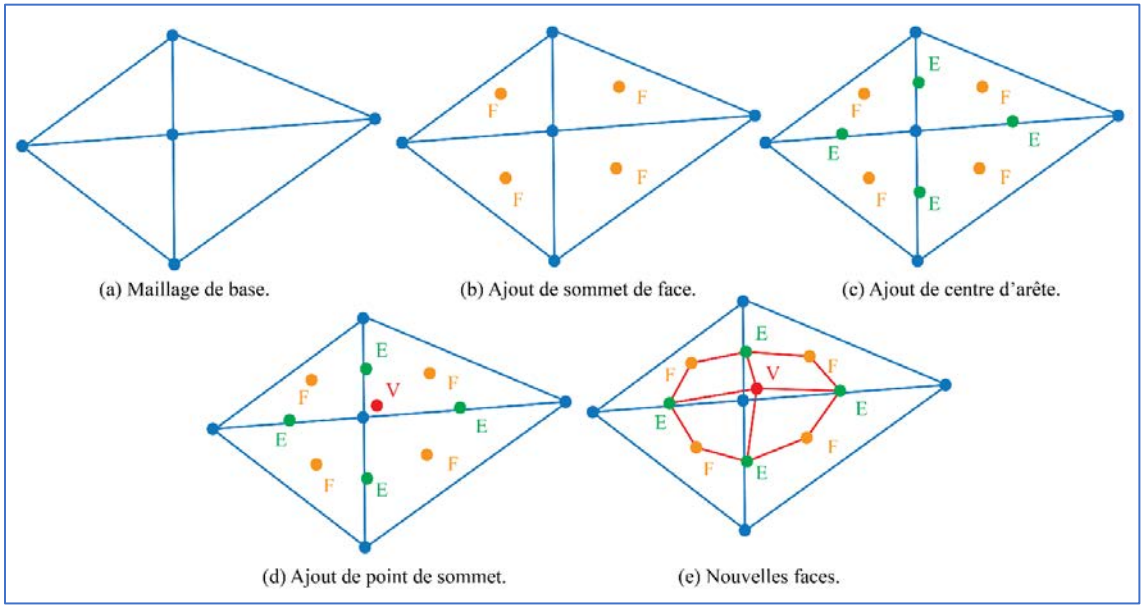


Figure 1-5 : Schéma de subdivision de Catmull-Clark

b) Schéma de subdivision de Doo-Sabin

Ce schéma de subdivision s'agit d'un algorithme d'approximation qui s'effectue selon les étapes suivantes :

- Calculer les milieux de chaque segment du maillage ;
- Calculer les milieux de chaque face du maillage (définis par la moyenne des sommets de la face considérée) ;
- Pour chaque sommet des faces, on joute un point dont les coordonnées sont la moyenne des sommets de la face considérée (Figure 1.6 (a) ;
- Les nouvelles faces du maillage sont obtenues en reliant ensemble les différents points ajoutés sur une même face d'un côté (Figure 1.6 (b)) et les points ajoutés au voisinage d'un sommet original d'un autre côté (Figure 1.6 (c)).

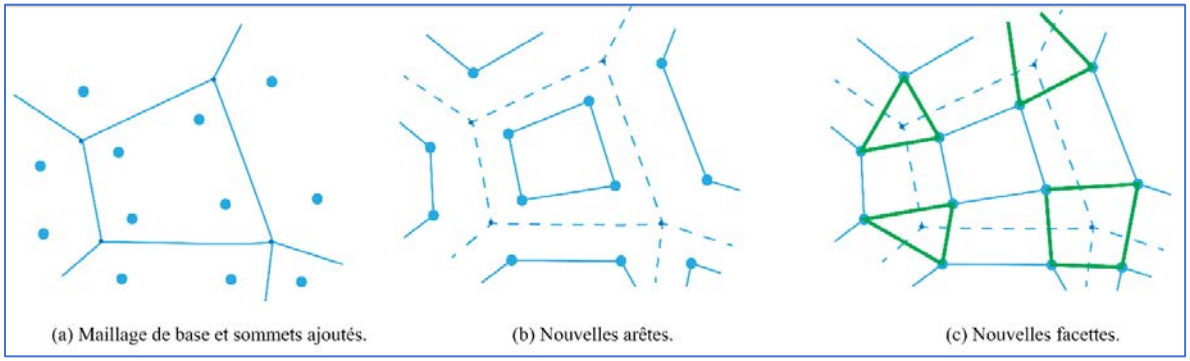


Figure 1-6 : Schéma de subdivision de Doo-Sabin

c) Schéma de subdivision de Loop

Ce schéma introduit par Charles Loop [15], il s'agit d'un schéma de subdivision primal pour approximer des maillages triangulaires. En utilisant ce schéma, le nouveau maillage est déduit suivant les deux étapes suivantes :

- La première étape consiste à effectuer un processus de raffinement sur maillage de base en ajoutant des nouveaux sommets. Ceux-ci correspondent aux milieux des arêtes. En reliant ces sommets, chaque triangle est alors subdivisé en 4 nouveaux triangles (Figure 1.7 (b)).
- La deuxième étape consiste à déplacer les sommets du maillage suivant une loi de positionnement prédéfinie, de manière à obtenir un maillage lisse (Figure 1.7 (c)). La position du nouveau sommet est donnée par une moyenne pondérée de ses sommets voisins dans le maillage.

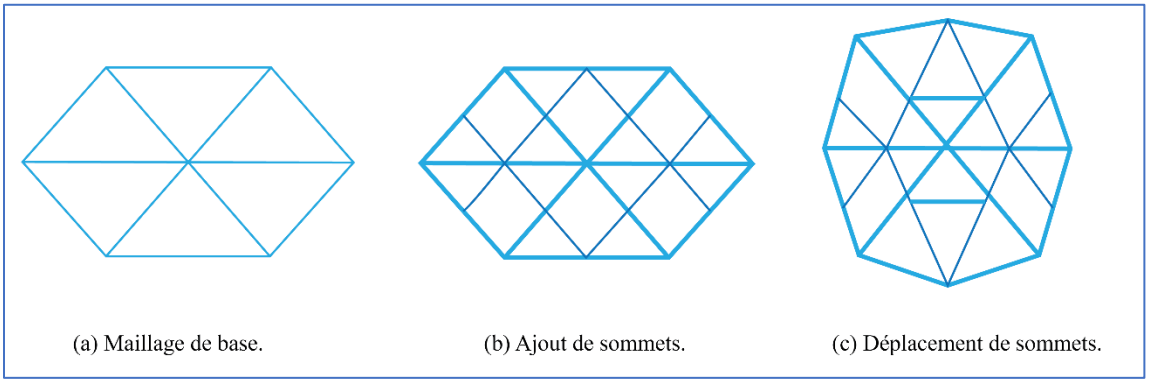


Figure 1-7 : Schéma de subdivision de Loop

1.2.2. Surfaces implicites

Jusqu'à présent, nous avons vu comment définir une surface de manière explicite. Cette représentation explicite est avantageuse pour le rendu de l'objet 3D. Cependant, Cette définition

n'offre pas d'information sur la position des points situés hors de l'objet 3D, et elle nécessite un contrôle explicite de la connectivité. En effet, pour effectuer des changements topologiques nécessaires à l'animation d'un objet, l'utilisateur est obligé de traiter explicitement ces changements ce qui se révèle complexe d'un point de vue pratique et couteux en temps de calcul.

Une surface implicite est définie par une fonction $F:\mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$ qui associe une valeur scalaire à chaque point de l'espace. Soit S une surface plongée dans $\mathbb{R}^3$, la représentation implicite de S revient à définir les positions de l'ensemble de ses points comme étant la solution d'une équation à 3 variables. Ainsi S peut être définie par l'expression suivante :

$$S = \left\{ X \in \mathbb{R}^3 \middle| F(X) = iso \right\} \qquad (1.2)$$

avec iso est une valeur scalaire constante appelée l'iso-valeur.

Les fonctions implicites les plus connues et les plus simples sont les ellipsoïdes définis par une fonction F de la forme :

$$F(x,y,z) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \quad (1.3)$$

Notons que le choix de F n'est pas unique pour modéliser une surface S donnée. De plus, tout couple $\langle F, iso \rangle$ ne représente pas la surface de la même manière décrite précédemment par le paramétrage d'un domaine du plan dans l'espace. Le tableau 1.2 représente quelques avantages et inconvénients des surfaces implicites.

Avantages	**Inconvénients**
– Il est facile d'obtenir un grand nombre de formes différentes à l'aide de fonctions mathématiques simples. – Avec la modification de *iso* génère des surfaces avec des topologies différentes.	– Le contrôle direct de la structure de la surface n'est pas assuré. – Il n'est pas possible de déterminer si un point de l'espace appartient ou non à une surface implicite. – On ne peut pas connaitre le voisinage explicite d'un point d'une surface implicite.

Tableau 1-2 : Avantages et inconvénients des surfaces implicites

De la même manière que la modélisation explicite, connaitre exactement la fonction F ne permet pas forcément de modéliser entièrement une surface complexe. Il est toujours nécessaire de passer par une étape d'approximation discrète. Dans ce contexte, les surfaces implicites à squelettes représentent une solution qui a connu un succès. Elles consistent à utiliser des primitives qui jouent le rôle de squelette de modélisation de la surface implicite (point, segment, courbe, surface) pour lesquelles il est possible d'évaluer la distance à un point donné et une fonction potentiel permettant de définir une épaisseur autour de ce squelette. La modélisation est ainsi fortement simplifiée. De nombreuses approches se sont intéressées au choix de primitives du squelette ainsi qu'au processus du mélange des potentiels [16, 66, 67, 154, 64].

1.2.2.1. Modèle discret par squelette

Les modèles implicites par squelettes sont créés par la décomposition du champ de potentiel global F en n champs partiels simples f_i. Ces champs de base définissent des surfaces partielles qui seront ainsi mélangées implicitement. Alors F est formulée comme suit :

$$F(p) = \underset{i\in[1,n]}{K} f_i(p) \quad (1.4)$$

Avec K est l'opérateur de composition.

L'union directe des champs partiels est l'opérateur de composition le plus utilisé [123], mais il est possible de définir des opérateurs spéciaux et plus complexes souvent restreint aux combinaisons binaires. Les champs de base f_i sont des fonctions définies à partir de primitives de squelette (points, segments ou triangles). Ainsi, la fonction associée possède des caractéristiques contrôlables liées au positionnement et à l'orientation du squelette. Les modèles de squelette utilisés pour la modélisation des surfaces implicites sont nombreux, on peut citer :

a) Représentation en Blobs

Cette représentation connue sous le nom de Blobs, a été introduite au début des années 1980 par Blinn [21]. Elle consiste à utiliser une primitive sphérique comme squelette. Soit par exemple un squelette formé par un seul point dans une position initiale c_0, la fonction de potentiel f_i associée à ce squelette dans une autre position p de l'espace, est donnée par la formule suivant :

$$f_i(p) = \exp\left(-\|p - c_0\|^2\right) \quad (1.5)$$

Plus précisément, la fonction f_i est considérée comme une fonction décroissante de la distance par rapport à la position du squelette.

b) Surfaces de convolution

Les surfaces de convolutions introduites par Bloomenthal et Shoemake [22], permettent de créer des mélanges lisses de primitives implicites complexes à l'aide d'un mélange par sommation. En effet, le champ résultant de cette approche peut donc être considéré comme la somme infini des contributions d'un ensemble de squelettes unidimensionnels. La fonction f_i associé à un squelette unidimensionnel est donc obtenue par l'intégration suivante :

$$f_i(p) = \int_{q \in E} g\left(\|p - q\|\right) dq \quad (1.6)$$

Avec g est la fonction noyau d'intégration du squelette E.

Nous pouvons noter que les surfaces de convolution introduites par McCormack et al. [104] sont parmi les plus utilisées. Elles consistent à utiliser un noyau d'intégration particulier appelé noyau quasi-Cauchy (par simple ressemblance avec la loi de Cauchy élevée au carré [127]). La fonction noyau g utilisée dans ce cas a l'avantage d'être lisse et rapidement décroissante. En plus, l'intégrale le long d'un segment est facilement déterminé :

$$g(x) = \frac{1}{\left(1 + s^2 x^2\right)^2} \quad (1.7)$$

Avec s un paramètre qui permet de contrôler le rayon de décroissance.

Les avantage et inconvénients des surfaces de convolution sont cités dans le tableau 1.3 ci-après.

Avantages	Inconvénients
– La surface résultante est une surface lisse, même si les squelettes possèdent des discontinuités au niveau des tangentes. – La surface résultante ne possède pas de marques visuelles de transition lors du passage d'un squelette à l'autre.	– La nécessité d'évaluation de l'intégrale de la fonction g pour chaque fonction de potentiel f_i.

Tableau 1-3 : Avantages et inconvénients des surfaces de convolution

1.3. Déformation physique

La déformation peut être vue comme la réponse d'un corps aux forces à laquelle il est soumis. Si cette réponse respecte des lois physiques décrivant l'évolution d'un corps réel, la déformation est dite physique. Théoriquement, les lois décrivant l'évolution d'un objet sous l'action des forces sont exprimées de manière différentielle, à la fois temporellement et spatialement. L'évolution de la forme de l'objet se formule donc à l'aide d'intégration d'une équation aux dérivées partielles. Les avantage et inconvénients des approches physiques de déformation sont cités dans le tableau 1.4.

Avantages	Inconvénients
– Le résultat obtenu avec ces approches est visuellement plausible. – Le résultat est quantifiable, ce qui assure un degré de précision absolue pour l'utilisateur. – La cinématique et la dynamique de l'objet sont prises en compte lors de la déformation.	– Le contrôle du résultat final issu d'une déformation physique est généralement difficile. Il devient nécessaire de refaire déformation pour tenter de converger vers le résultat souhaité. – La résolution des équations aux dérivées partielles est généralement effectuée à l'aide d'outils avancés d'analyse numériques. Ces solutions numériques sont spécialement couteuses en temps d'exécution et en mémoire. De plus, les risques de divergence numérique sont probablement forts.

Tableau 1-4 : Avantages et inconvénients des approches physiques de déformation

1.3.1. Modèle à masses-ressorts

Les modèles masses ressorts sont mis en place dans des applications de modélisation informatique par Miller et al [107]. Ce sont les modèles physiques les plus simple d'un point de vue théorique et pratique.

Bien que les modèles à ressorts soient connus par leur approximation d'un objet continu en positions discrètes, ils sont peu précis par rapport aux approches continues telles que l'approche par volume ou élément finis. Cette faiblesse se révèle spécialement handicapante pour les

applications graphiques destinées au domaine médicale ou d'ingénierie ayant pour vocation de servir de prédiction numérique exacte. Cependant, les autres domaines graphiques ne nécessitent pas la garantie de l'aspect prédictif du modèle, mais essentiellement d'assurer une apparence visuelle plausible. Par conséquent, ce modèle se révèle très adapté dans de nombreux cas d'animation 3D et reste l'une des méthodes les plus répandues.

À l'aide de ce modèle, un objet étant représenté par des masses discrètes, les seuls degrés de liberté prise en charge sont ceux de la translation de ces masses. Soit p_i la position d'une masse discrète i. Ces masses et leurs caractéristiques sont appelées *particules*. Entre deux particules, on considère le module d'élasticité constant. Ce qui peut être traduit par modélisation par un ressort. Ce système est résumé par la loi de Hook comme suit :

$$H = R\Delta L \qquad (1.8)$$

Avec H est la force de traction/compression générée par le ressort, ΔL est la variation de longueur de la particule par rapport à sa position de report, R est la raideur du ressort, aussi appelée constante de rappel.

Dans le cas d'un modèle 3D, l'équation vectorielle d'un ressort centré en position p_0 avec une longueur au repos L_0 est exprimée comme suit :

$$H = R\left(\left\|p - p_0\right\| - L_0\right)\frac{p - p_0}{\left\|p - p_0\right\|} \qquad (1.9)$$

Un modèle 3D complet est représenté par une structure de graphe contenant des sommets V_i et M_i les ressorts reliant ces sommets. Éventuellement, chaque sommet de v est relié à d'autres sommets générant alors un grand nombre de ressorts.

En pratique, les sommets V_i sont seulement reliés à leurs voisins les plus proches topologiquement. Ainsi, pour modéliser des objets volumiques, on utilise des ressorts diagonaux, comme dans la proposition de Chen et al. [34], alors que les objets comme des tissus, sont modélisés des ressorts vers les voisins d'ordre 2 comme dans la proposition de Breen et al. [25]. On désigne la configuration (V_i, M_i) sous le terme réseau.

Le tableau 1.5 ci-après présente quelques avantages et inconvénients d'une approche masses-ressorts.

Avantages	Inconvénients
– Ces modèles discrets sont caractérisés par leur simplicité d'implémentation, ainsi qu'ils sont adaptables directement aux surfaces polygonales. – Les modèles discrets sont caractérisés par leur rapidité de simulation. Ce qui explique leur réussite à obtenir des résultats interactifs utilisable dans les jeux vidéo.	– La résolution numérique de systèmes à masses ressort peut générer des divergences du système qui s'interprètent visuellement par des coupures brutales pouvant aller jusqu'à l'explosion du modèle. – La modélisation par masse-ressort ne converge pas absolument vers le résultat physique réel. – Il est difficile de prévoir le comportement de modèle lors de la simulation à haute résolution.

Tableau 1-5 : Avantages et inconvénients de l'approches déformation par masses-ressorts

1.3.2. Animation physique de vêtements

Les simulations physiques de vêtements ont été traitées, il y a longtemps dans le domaine d'informatique graphique [30, 15, 136], ces recherches sont basées sur les mesures physiques de raideurs proposées par Kawabata [79]. Récemment, des approches de simulations particulaires restent les plus répandues [52, 95] pour des applications interactives. Ainsi, la modélisation par la mécanique des milieux continus a connu un développe important [136, 76]. Une simulation de vêtements portés par un personnage virtuel nécessite également la mise en place d'un processus robuste de gestion de collisions entre le tissu et le corps animé. Ce processus n'entre pas également dans le cadre de ce travail. Cependant on peut noter que la méthode de traitement des collisions proposée par Bridson et al. [26] est l'une des approches les plus utilisées dans ce cadre (intégré dans des logiciels de modélisation et animation comme Blender [38]).

Afin d'obtenir l'apparence visuelle plausible d'un vêtement porté par un caractère virtuel, il est nécessaire de créer une surface caractérisée par un faible étirement ou contraction. Dans la réalité, un tissu peut ainsi être définit comme une surface quasi-inextensible. C'est-à-dire que les

longueurs mesurées à chaque point de la surface restent pratiquement préservées. Les vêtements ont souvent la caractéristique de se replier sans contraction ni élongation. Visuellement, cette contrainte intrinsèque de la surface représente l'origine de la génération des plis caractéristiques des vêtement.

Par conséquent, lors de l'une simulation d'un vêtement 3D, la contrainte intrinsèque de la surface doit donc être formulée par son modèle physique. La manière la plus simple consiste à modifier arbitrairement les valeurs de raideur des systèmes masses-ressorts standard. Cependant cela présente des problèmes majeurs :

- L'instabilité des modèle masse-ressort. En effet, une simulation avec une propriété qui limite la compression dans le plan de la surface rend invariablement la résolution des systèmes male conditionnée [35].
- Le problème de rigidité de modèle masse-ressort dans le cas de maillages triangulaires [43, 34]. Connu sous le terme de *locking artifact*, c'est la difficulté de déformer le modèle qui soumit l'action de contraintes. Cela est causé par l'augmentation de la raideur des ressorts ce qui rend le modèle très rigide.

L'utilisation de modèles masses-ressorts est particulièrement efficace pour simuler des objets de surfaces peu rigides à basse résolution. Ils assurent une déformation interactive qui prend en considération la dynamique du mouvement tout en gérant les collisions. Par contre, ces modèles ne sont pas adaptés pour le cas d'animation de vêtements portés par des caractères virtuels et qui présentent des plis lors de l'animation. Dans ce cadre, on note qu'il existe plusieurs tentatives d'amélioration de ces modèles ; par exemple ; la proposition de Bergou et al. [17] proposent une approche qui utilise une simulation à basse résolution pour guider une simulation à haute résolution afin d'ajoutes des détails ultérieurs sur le maillage de vêtement.

1.4. Déformations géométriques

Comme alternative aux approches physiques, les approches géométriques se concentrent non plus sur les lois qui produisent la déformation, mais sur le résultat de l'animation elle-même. Précisément, c'est des méthodes axées sur les résultats à l'opposition de modèle générateur. En utilisant ces modèles géométriques l'artiste modélise l'animation qu'il souhaite par la déformation directe de la forme de l'objet.

Les approches géométriques permettent de surmonter la complexité de la modélisation basée sur des contraintes physiques. En effet, la création d'une animation de caractère virtuel complet à l'aide du mouvement physique de squelette, muscles, tendons, etc. est d'une complexité énorme. En outre, il est relativement préférable de déplacer certaines parties du corps manuellement tels que la main, le bras, etc. Par contre, l'artiste ne peut pas contrôler directement ces types d'actions à l'aide des forces physiques.

1.4.1. Classification des méthodes géométriques

Pour donner à l'utilisateur un large choix de modélisation et d'animation, il est préférable de définir des méthodes de déformation destinées aux diverses surfaces à animer. Dans le cas d'un maillage, le déplacement individuel de chaque sommet permet un degré de liberté très élevé, cependant ce type de déplacement est hors de portée d'un utilisateur. Par conséquent, il convient désormais que les outils de déformations géométriques doivent assurés un compromis entre les degrés de liberté destinés à la déformation et la simplicité de spécification de ces outils. Plusieurs méthodes de déformations géométriques ont été déjà développées et elles sont intégrées dans les outils professionnels de modélisation à savoir la méthode de déformation par cages, par subdivisions, par squelettes, etc.

On peut distinguer trois types principaux de déformations géométriques :

- Déformations de l'espace : cette catégorie vise à déformer l'espace dans lequel il est modélisé l'objet.
- Déformations basées modèles : cette catégorie consiste à définir dans l'espace des échantillons des formes possibles à l'aide d'un nombre restrient de paramètres. La structure finale de l'objet est alors donnée par une combinaison de ces paramètres.
- Déformations basées surfaces : ce type de déformation définissant la forme à partir de certaines propriétés que la surface de celle-ci doit assurer.

1.4.2. Déformations de l'espace

Les déformations de l'espace consistent à considérer le modèle comme étant simulé dans un espace 3D. Le processus de déformation n'est donc pas appliqué directement sur la surface de l'objet, mais sur l'espace qui le comporte. Ce type de méthode est indépendant du type de définition du modèle à déformer. Ainsi la surface du modèle peut être définie par un maillage, par une surface implicite, ou même par des points non connectés.

Il existe diverses méthodes simples et contrôlables pour déformer un espace 3D [7, 49]. Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques modalités de méthodes classiques. La déformation par cages, guidées par le geste ou par des courbes. Ensuite nous allons détailler plus particulièrement la déformation par squelettes.

1.4.2.1. Déformations par cages

Cette catégorie de déformation est la plus intuitive à comprendre. Dans ce cas, l'espace 3D étant défini comme une grille que on appelle cage répartie dans un intervalle de l'espace. En bougeant les points caractéristiques de la cage, on déforme l'espace contenu par interpolation suivant la position de ces points.

Dans la configuration la plus simple, la cage est définie en grille cartésienne rectangulaire contenant $\left(N_i \times N_j \times N_k\right)$ point caractéristique, orientée suivant le repère global de l'espace $\left(i, j, k\right)$. L'utilisateur peut facilement déplacer l'ensemble des points de la grille, ce qui engendra ensuite une déformation globale, continue et lisse de l'espace. Classiquement, l'interpolation de l'espace se fait à l'aide des fonctions splines. Les positions de la grille sont considérées alors comme polygone de contrôle, cette méthode est connue sous le nom de la déformation de forme libre (*FFD : Free Form Deformation*) [125, 37, 72].

Bien que les méthodes FFD avec grille sont connues par leurs relations directes avec les fonctions d'interpolation lisses de type spline, la grille utilisée ne prend pas en compte la topologie d'un objet complexe. En effet, deux modèles proches dans l'espace, mais éloignés sur le plan géodésique, seront déformés de manière quasi identique par l'interpolation utilisée. Si on prend par exemple l'animation d'un personnage représenté dans une telle grille. Le déplacement des points de contrôle de la grille influence le bras gauche et influencera également le bras droit. Il n'est pas possible de faire bouger indépendamment les articulations d'un tel personnage.

1.4.2.2. Déformations définies par le geste

Pour avoir une déformation plus contrôlable, Angelids et al [8] ont proposé une méthode qui prend comme paramètre les informations de geste d'un utilisateur à savoir la trajectoire et la région d'influence, ces informations sont ensuite utilisées comme guide de la déformation à réaliser. L'idée principale est d'établir une série de déformations rigides effectuées dans l'espace suivant une trajectoire définie par l'utilisateur. L'importance de chaque déformation est

déterminée par le temps passé sur chaque position. Finalement, les déformations sont interpolées à l'aide de la méthode d'interpolation linéaire comme dans la proposition de Alexa et al. [5].

Ce type d'approche permet de réaliser des déformations qui préservent les caractéristiques géométriques complexes d'un objet 3D. Cependant, son application demande une intégration temporelle des sommets le long d'un champ vectoriel. Les trajectoires suivies ne sont pas définies analytiquement pour les champs utilisés, ainsi que l'intégration doit se réaliser numériquement ce qui empêche la déformation en temps réel d'un maillage ayant une haute résolution.

1.4.2.3. Déformations basées sur des courbes

En 1998 Singh et al. [130] ont introduit un concept appelé Wires, qui permet de générer des déformations sur la surface d'un objet. Cette méthode est basée sur le concept de tracer des courbes sur la surface, ensuite de générer des inflations locales autour de ces courbes tracées. Comme dans le cas des FFD, le système Wire est applicable sur différents modèles de surface, qu'il s'agisse des sommets d'un maillage ou d'un ensemble de points de contrôle. De même, Cutler et al. [49] ont proposé une méthode basée sur des courbes pour effectuer des déformations locales sur le maillage de vêtement. En adoptant le même concept de cette dernière méthode, Rohmer et al [122] ont proposé une méthode de création de plis de tissu à base des courbes.

Ces méthodes s'avèrent intéressantes pour la génération de détails sur des surfaces tels que des plis de vêtements portés par des personnages. Notons que les plis de vêtements sont principalement constitués par le mouvement du corps humain, ce mouvement peut être une compression ou un étirement. Il est essentiel que ces plis puissent se mélanger d'une manière lisse lors de mouvement de tissu.

1.4.2.4. Déformations par squelettes

Les déformations à l'aide de squelettes rentrent dans le cadre des méthodes de déformation de l'espace, bien que qu'elles soient uniquement appliquées sur les sommets discrets d'une surface triangulée [81]. Dans ce cas, l'objet prolongé dans l'espace est contrôlé par la position d'un squelette d'animation : c'est une structure hiérarchique de repères (appelé articulation) liés par des lignes (appelé os), comme il est illustré sur la figure 1.8. Cette catégorie d'animation est préférable pour les formes articulées (personnages, mains, …), à cause de la forte ressemblance entre la structure d'un squelette d'animation et le squelette anatomique du corps réel.

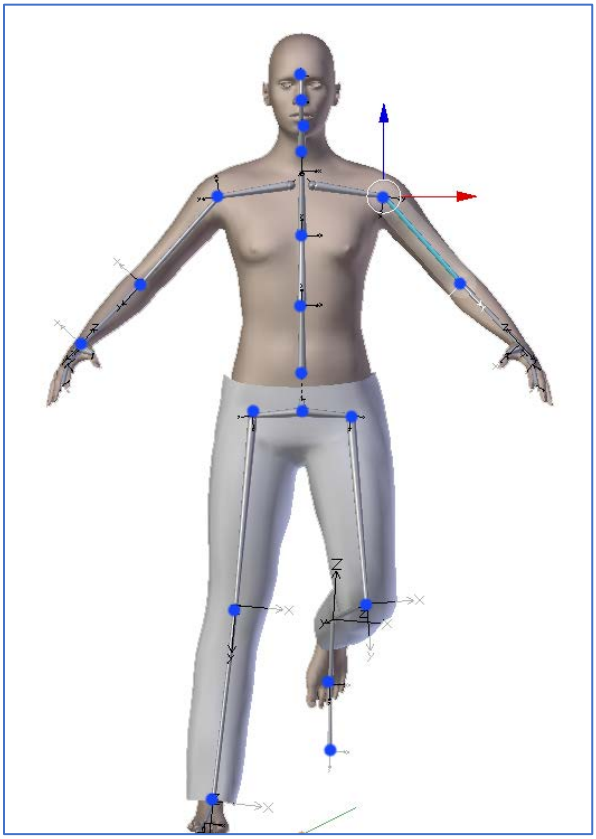


Figure 1-8 : Exemple de squelette d'animation formé par une structure hiérarchiques de repères

Le principe de la déformation à l'aide de squelette d'animation est le suivant :

- Chaque partie de l'espace est pratiquement liée à un ou plusieurs repères de squelette d'animation.
- Il est facilement possible de d'articuler manuellement les os, ce qui permet de définir l'animation du squelette.
- La déformation de l'espace lors de l'animation est calculée comme la somme pondérée des positions relatives des articulations du squelette d'animation.

1.4.3. Déformation par enrobage (alias Skinning)

En animation, cette méthode est connue sous le nom de *Skinning*, dans laquelle la déformation d'un objet est contrôlée par un mélange de transformations rigides des os du squelette. Elle est souvent utilisée pour l'animation de personnages, dans les jeux vidéo et les effets spéciaux. Le but de cette méthode est de définir l'animation d'un personnage en manipulant son squelette ; c'est à dire d'exprimer la position d'un maillage surfacique par un ensemble de degrés de liberté comprenant la position et l'orientation, couramment représentés par des repères.

1.4.3.1. Enrobage rigide

L'enrobage rigide (*Rigid skinning*) est l'une des premières méthodes créées pour l'animation des caractères virtuels dans le domaine de jeux vidéo 3D, cette technique est inspirée de chaine articulé en mécanique. L'idée principale derrière l'enrobage rigide est d'attacher les sommets du maillage à certains os du squelette [81]. Le nombre d'os du squelette est arbitraire, mais chaque sommet du maillage est associé à la position d'un unique os. Par conséquent, l'objet animé est partitionné en segment suivant le mouvement des articulations du squelette. L'utilisateur a donc le choix de faire bouger certaines articulations par des translations ou des rotations, et tous les sommets qui suivent les os animés seront ensuite repositionnés.

Soit $M_j(t)$ la matrice de transformation associée à l'articulation j du squelette à un instant t. Nous supposons que le squelette soit dans sa position de repos à l'instant t_0. La position $p(t_0)$ d'un sommet quelconque de l'objet peut être modifiée en appliquant la transformation $M_j(t)$ au cours du temps. Cette déformation dite rigide est effectuée à l'aide de la formule suivante :

$$p(t) = M_j(t) M_j^{-1}(t_0) p(t_0) \qquad (1.10)$$

Cette relation est exprimée dans un repère local dont l'origine est l'articulation j. Par conséquent la déformation engendrée (enrobage rigide) n'est pas une transformation globale. Ce qui peut entraîner des auto-intersections et élongations importantes dans la surface déformée. La méthode d'enrobage rigide a été largement utilisée dans l'implémentation des jeux vidéo [14].

1.4.3.2. Enrobage lisse

Afin d'éviter les défauts d'enrobage rigide (auto-intersections et élongations) dans le cas des caractères animés, M-Thalmann et al. [101] ont proposé une approche d'enrobage lisse (*Smooth Skinning*). Cette approche permet de lier le calcul de la position des sommets au mouvement de plusieurs articulations au même temps. L'influence qu'exerce chaque articulation sur la position du sommet est donné par un paramètre de pondération w appelé poids d'enrobage. Sur la figure 1.9, nous avons illustré un exemple de déformation d'un cylindre avec l'enrobage lisse.

La déformation par enrobage lisse est très répandue dans le domaine graphique. Elle est référencée sous diverses appellations [53, 84, 68] : déformation en sous-espace (*SSD : Subspace Deformation*) ou l'enrobage par interpolation linéaire (*LBS : Linear Blend Skinning*).

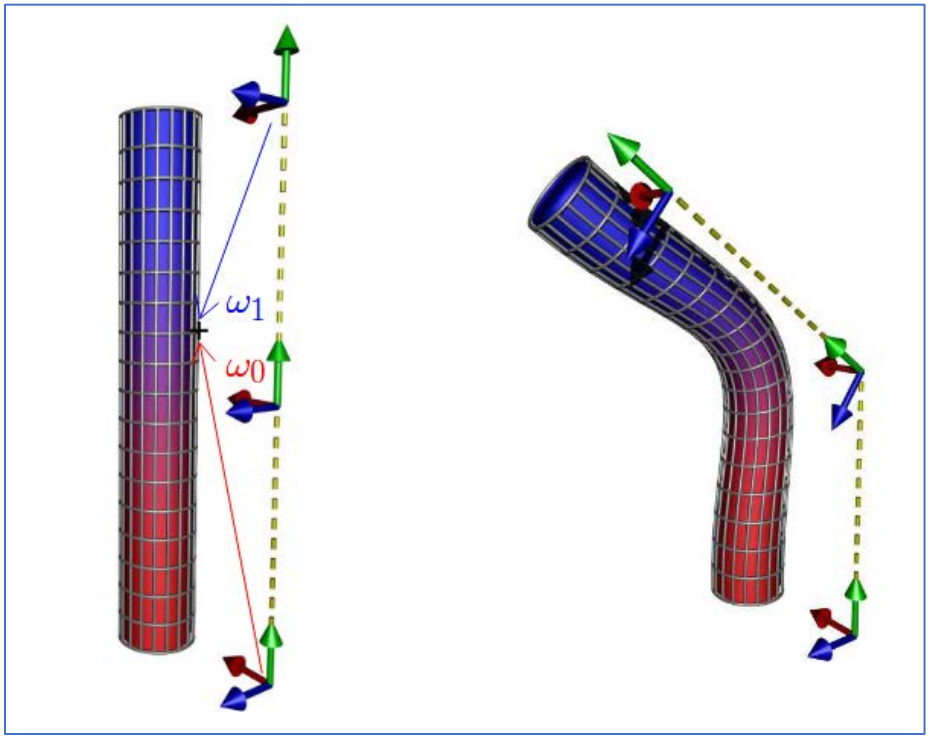


Figure 1-9 : Exemple de déformation par enrobage lisse

Dans le tableau 1.6, nous avons cité quelque avantages et inconvénients de la méthode d'enrobage lisse.

Avantages	Inconvénients
– Cette méthode est devenue un outil de déformation standard dans les logiciels professionnels à cause de son implémentation facile et l'efficace. – L'utilisation d'une hiérarchie similaire à une structure anatomique de squelette humain est très intuitive pour la déformation d'un personnage articulé. – Le paramètre de poids d'enrobage offre à l'utilisateur un contrôle sur l'apparence de la déformation finale.	– La déformation produit une perte de volume local visible dans des surfaces fermées telles que les parties du corps (Figure 1.10). Cet artefact est connu sous le terme de *collapsing-elbow effect*.

Tableau 1-6 : Avantages et inconvénients de l'approches déformation par enrobage lisse

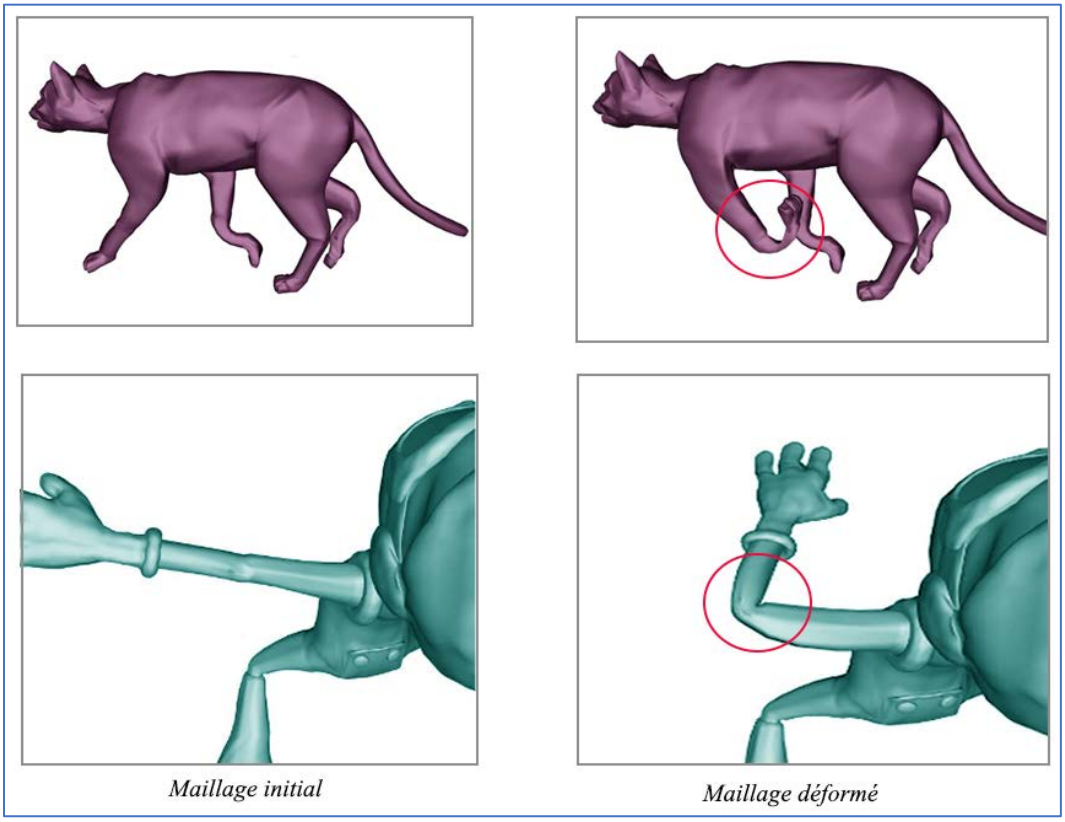


Figure 1-10 : Exemple de l'effet de "collapsing elbow" indiqué par les cercles rouges

Pour surmonter les problèmes liés à l'enrobage lisse, les artistes font recours à une manipulation des poids d'enrobage en exerçant des interpolations plus précises au niveau des articulations. Cependant, la réalisation de ce type de poids demande plus de temps et d'expertise. En effet, quoique les logiciels professionnels de modélisation offrent la possibilité d'appliquer directement les degrés d'influence de poids de l'articulation sur les sommets du maillage, les contraintes de normalisation des poids due à la combinaison barycentrique qui rendent leur manipulation plus difficile.

Dans le cas d'un personnage articulé, certaines rotations ne sont pas faciles à modéliser en utilisant l'approche d'enrobage lisse LBS. Par exemple, dans le cas d'une rotation d'angle 90° du bras autour de son axe, l'interpolation engendrée par l'enrobage LBS projettera tous les sommets vers le centre de l'articulation ce qui provoque artéfact connu sous le terme *d'emballage de bonbons* (Figure 1.11). Ce problème est généralement causé par l'expression d'interpolation de la méthode de d'enrobage LBS (annexe.). L'interpolation utilisée est une expression linéaire de matrice de rotation qu'est une opération instable dans l'espace de rotation.

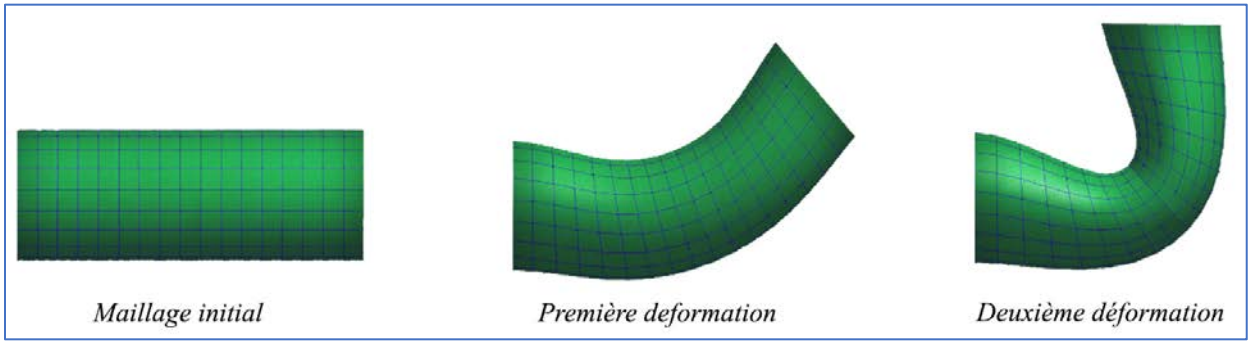


Figure 1-11 : Déformation d'un modèle de cylindre en utilisant méthode du LBS

1.4.3.3. Approches d'amélioration de l'enrobage lisse

Pour surmonter le problème d'interpolation dans la méthode d'enrobage LBS, plusieurs approches ont été proposées. On distingue principalement deux catégories d'approche :

1.4.3.3.1. Approches basées sur l'apprentissage

L'approche proposée par Lewis *et al.* [89] utilise des échantillons de forme définis par des experts (artistes) pour un certain nombre de postures du squelette. Ensuite la déformation est effectuée à l'aide d'un vecteur de correction appliqué aux coordonnées des sommets de modèle déformé de manière à minimiser l'écart aux formes de références. Sloan et al. [131] proposent une approche similaire, mais en adoptant le principe de stocker les formes d'échantillonnage dans l'espace des formes de repos modifiées. Cependant cette approche est couteuse en mémoire lorsque le nombre de pose de déformation est énorme. Afin de limiter ce coût, la méthode nommée *Eigenskin* [82] introduit une analyse spectrale comme post traitement pour extraire les principales composantes de la correction nécessaire pour la correction de la déformation. Pour le cas d'une déformation interactive, Rhee et al. [118] proposent une implémentation de l'expression d'interpolation et sa correction sur GPU.

1.4.3.3.2. Approches de correction du volume

La proposition de Yang et Zang [151] modifie la déformation par enrobage pour le cas de surface sous forme de tube guidée par une seule articulation. L'idée principale de cette méthode est de donner à l'artiste la possibilité de définir les poids d'interpolation ainsi qu'une fonction de l'angle de pliage, afin de contrôler la déformation des sommets et minimiser les chances de production de l'effet de collapsing-ellbow.

Au lieu de se limiter à un cas particulier d'objet, d'autres approches proposent des opérateurs de déformation stable dans l'espace de rotation. Magnenat-Thalmann et al. [100] proposent une interpolation à base d'une combinaison linéaire de transformations (figure 1.12).

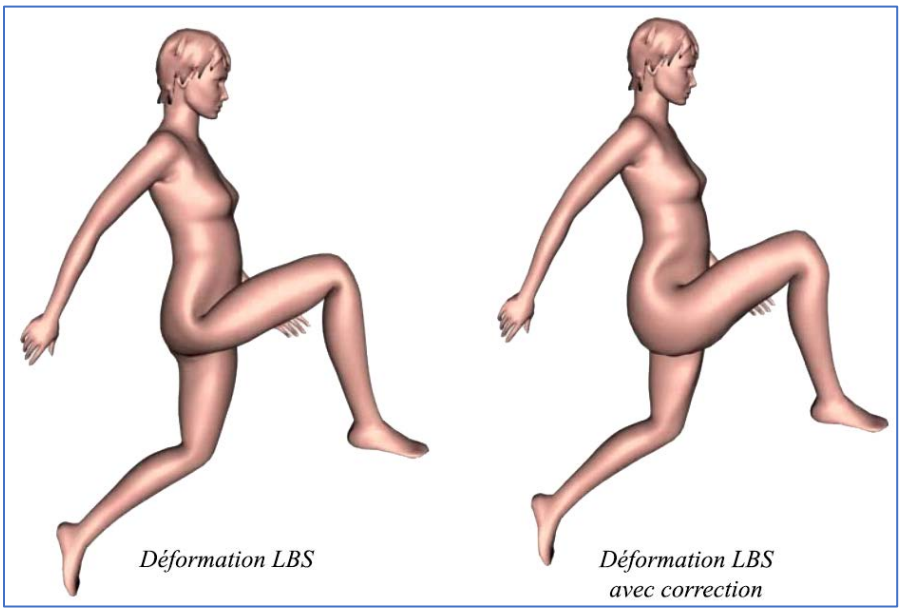


Figure 1-12 : Exemple de correction de déformation LBS

L'avantage de cette approche consiste en sa généralité de traitement de toutes les matrices (rotation, translation, agrandissement, …). Cependant, elle n'est pas préférable pour l'enrobage en temps réel. Pour surmonter ce problème de temps de calcul, Kavan et Zára [74] proposent une approche d'enrobage par mélange sphérique (Spherical blend Skinnig), qui est basée sur l'utilisation d'interpolation dans l'espace des quaternions. Bien que cette approche soit plus rapide, le traitement particulier des centres de rotations fait perdre une partie de l'avantage d'utilisation des quaternions.

Les mêmes auteurs ont proposé plus tard, une nouvelle approche unifiée qui permet de traiter directement les translations et les rotations Kavan et al. [75] (figure 1.13). Cette approche connue sous le terme d'enrobage par quaternions duaux (*DQS : dual quaternion skinning*) est une expression généralisée des quaternions qui prend en considération, d'une manière duale, les rotations et les translations (Annexe…).

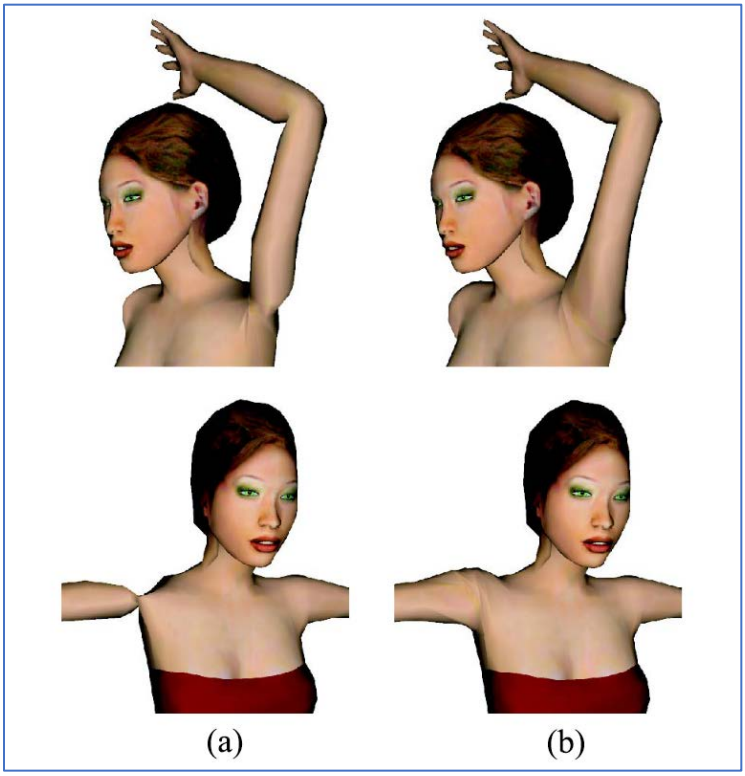


Figure 1-13 : Résultats de déformation ; (a) Enrobage LBS ; (b) Enrobage par quaternions doubles

L'interpolation à l'aide d'enrobage DQS offre une expression générale qui peut être calculée à vitesse interactive. De plus, cette expression facilite l'implémentation de l'interpolation sur carte graphique programmable. Cette approche d'interpolation est désormais devenue un standard dans les logiciels professionnel de modélisations. Bien que l'interpolation DQS présente moins de défauts de déformation que l'interpolation linéaire LBS, elle ne permet pas de définir une déformation à volume constant. De plus, cette approche est pratiquement très sensible aux choix des poids d'enrobage. Récemment, des méthodes de correction d'enrobage DQS ont été proposé. [138, 139] effectuent un enrobage par DQS dans une première étape, puis ils fixent les artefacts dans une seconde étape en considérant les intersections ou l'élasticité globale du modèle déformé.

Bien que les méthodes de skinning soient largement étudiées pour la production d'animation de personnages. Elles sont également utilisées dans un cadre général d'animation d'objets non articulés. Dans ce cas, le squelette d'animation est formé par un nombre de repères sans les organiser en structure hiérarchique. Ainsi, on peut définir une déformation d'espace pour n'importe quel objet [72,68,50]. Un cas particulier de ce type d'approche, pour la déformation de tissus [77,78] est illustré sur la figure 1.14.

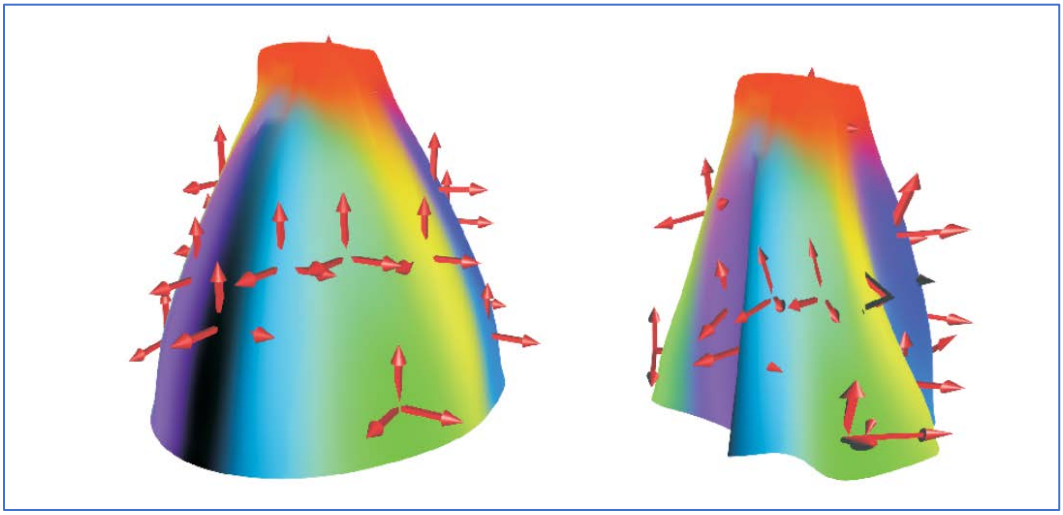


Figure 1-14 : Exemple du maillage du vêtement déformé en utilisant des repères non hiérarchiques

1.4.3.4. Calcul des poids d'enrobage

Comme nous avons vu précédemment, la déformation par enrobage nécessite de définir des poids d'influence des os sur les sommets de l'objet. Ainsi, il peut être défini automatiquement en utilisant les méthodes d'apprentissage citées précédemment. Cependant, ces méthodes d'apprentissage se révèlent moins pratiques que les méthodes d'enrobage standard. Pour cela, Il est nécessaire de définir manuellement ou de manière géométrique ces poids.

1.4.3.4.1. Définition manuelle

Les outils professionnels de modélisation offrent des méthodes plus génériques qui consistent à définir directement les poids d'enrobage sur la surface de l'objet à déformer. Ces outils ont pour avantage de laisser une grande liberté artistique lors de la modélisation. Des artistes experts possèdent des capacités de manipuler ce type des outils. Cependant, la normalisation des poids qui caractérise l'interpolation convexe rend cette manipulation moins intuitive. En effet, une simple modification d'un poids pour un os affecte directement les autres os attachés à celui-ci. Finalement, la création d'une répartition de poids homogène à l'aide de cette manipulation est très difficile. Bien que parfois les manipulations manuelles s'avèrent indispensables, le calcul automatique de poids permet d'éviter des tâches fastidieuses de définition de poids sur l'ensemble de la surface.

1.4.3.4.2. Distance au squelette

Dans la modélisation, les poids d'enrobage sont habituellement reliés à la distance cartésienne des sommets de l'objet au squelette d'animation. Par exemple, soient v un sommet de l'objet à

déformé, j un os du squelette d'animation et d_j la plus courte distance entre v et j. Les poids β_j d'enrobage pour ce sommet sont calculés par la formule suivante :

$$\beta_j = \left(\frac{1/d_j}{\sum_{i=1}^{N_j} 1/d_i} \right)^m \quad (1.11)$$

avec $m \in [1,10]$ un paramètre pour contrôler la vitesse de transition d'influence entre les os et N_j est le nombre d'os du squelette.

Nous pouvons noter que cette méthode n'est pas optimale pour le cas des os proches spatialement et qui influencent des parties indépendantes de l'objet. Pratiquement, si on utilise cette méthode pour l'animation d'une main virtuelle, les doigts de la main risquent de s'influencer les uns aux autres comme illustré sur la figure 1.15, on remarque que l'os en rouge influence l'articulation encerclée en vert.

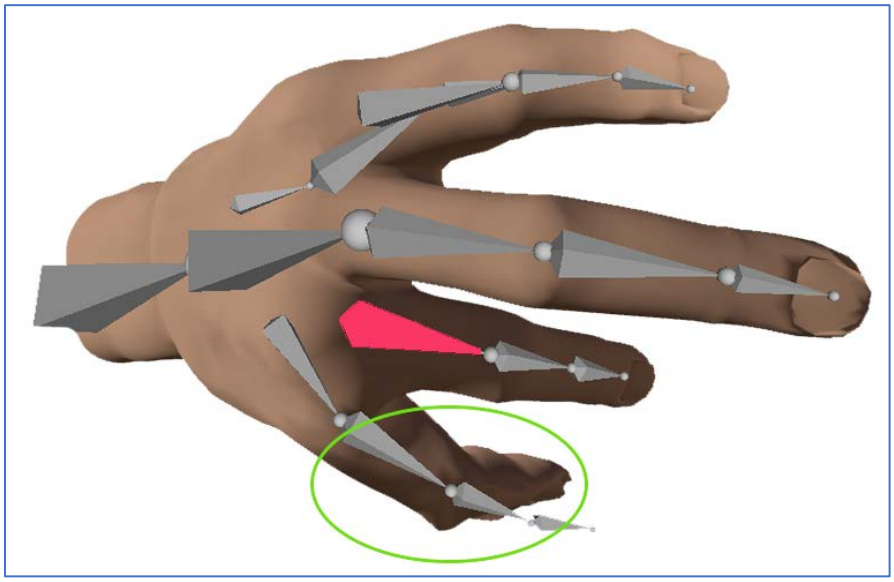


Figure 1-15 : Main virtuelle déformée par enrobage avec une distribution des poids non appropriés

Pour surmonter ce problème d'influence entre l'os et les sommets qui ne lui sont pas associés, Baran et Popovic [16] proposent une méthode de modification de la distance cartésienne basée sur l'équation de diffusion de la chaleur. La figure 1.16, illustre un exemple de diffusion de l'influence des poids.

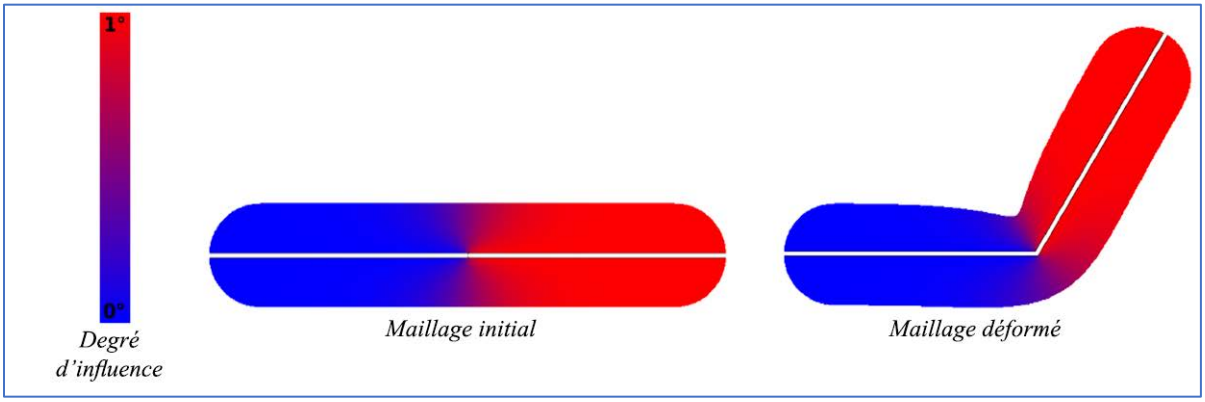


Figure 1-16 : Illustration de diffusion de poids d'enrobage par équation de la chaleur sur un cylindre ; Exemple issu de la proposition de [16]

Cette méthode est très optimale pour avoir une bonne approximation dans le cas d'un objet avec une forme simple ; ceci par l'introduction d'une pénalité sur la distance volumique qui permet de prendre en considération la structure géométrique de la surface à l'aide de calcul d'intersection [16]. Cependant, le calcul d'intersection demande parfois un temps de calcul très crucial, ce qui présente un cout très élevé pour une telle méthode. Ainsi, pour un objet avec une forme géométrique relativement complexe, c'est-à-dire un objet possédant des concavités comme le cas d'une main humaine, il est pratiquement difficile d'utiliser cette méthode pour initialiser correctement les poids d'enrobage. On note également que Weber et al. [144] proposent une méthode similaire, mais en adoptant un enrobage rigide uniquement. Hetroy et al. [62] proposent une méthode de calcul automatique de poids pour des surfaces construites à l'aide des formes cylindriques.

1.4.4. Déformations à base de modèles

Dans ce paragraphe on va présenter quelques approches standard de déformation à base de modèles. L'idée derrière ces approches est de construire un ensemble de formes à l'aide d'un nombre réduit de paramètres. En modifiant la combinaison de ces paramètres, on obtient un espace de formes.

On distingue deux approches dans cette catégorie :

- L'interpolation directe de formes de bases.
- L'extraction d'informations par apprentissage.

Le principal avantage de cette catégorie d'approche consiste en sa capacité de créer des déformations arbitraires et complexes à l'aide d'un faible nombre de paramètres. Cependant, la

difficulté principale étant d'avoir un contrôle intuitif sur les paramètres définis pour décrire les déformations souhaitées. On décrit dans la suite les deux approches de cette catégorie ainsi que ces applications dans le processus de déformation. Cependant, nous n'allons pas réaliser une étude approfondie des publications dans ce cadre.

1.4.4.1. Interpolation de formes

L'interpolation de formes (*Morphing*) est basée sur l'idée de concevoir un certain nombre de formes prédéfinies appelées formes clés. Cette méthode de déformation est largement utilisée dans l'animation de visage humain [88,10,79]. En effet, la déformation faciale est connue par sa complexité de modélisation, et en plus l'œil humain est très sensible aux défauts qui peuvent être engendrés par cette déformation. Ainsi, il est optimal de choisir dans l'ensemble prédéfini des formes et de valider le choix à chaque fois, au lieu de créer la déformation à l'aide des outils de déformation géométrique. Cependant, cette interpolation (linéaire ou polynomiale) ne permet pas de préserver les détails originaux de l'objet déformé, elle est particulièrement dépendante des caractéristiques des formes prédéfinies. Par conséquent, les artistes modélisent manuellement un grand nombre de formes pour générer la déformation nécessaire. Par exemple, dans le film d'animation *Le Seigneur des Anneaux*, la modélisation du personnage de *Gollum* a nécessité l'utilisation de 675 formes clés [47].

1.4.4.2. Méthodes d'apprentissage

La déformation par des méthodes d'apprentissage est exécutée en deux étapes : La première étape est considérée comme une étape de pré-traitement, elle consiste à extraire des informations spécifiques depuis des formes données en entrée. La deuxième étape consiste à générer les déformations de l'objet à déformer en prenant en compte ces informations extraites. Cette méthode est définie comme une généralisation de l'interpolation de forme. En utilisant cette méthode on n'aura pas besoin de stocker en permanence la totalité des formes de bases, mais on retient seulement les informations nécessaires pour la déformation.

Pour l'application de ces méthodes d'apprentissage dans le cas d'animation des personnages articulés, certains auteurs se basent sur un modèle généré à l'aide d'enrobage standard, ensuite ils améliorent ce modèle à l'aide des informations issues des formes d'apprentissage. Certaines approches extraient des informations numériques depuis une décomposition en composantes principales [82, 143, 149], ce qui permet de créer des déformations arbitraires, mais ces

composantes principales restent très difficiles à manipuler. Yang et al. [151] proposent une approche à base des fonctions associées à la pose géométrique par régression. Cette approche est aisément manipulable mais le modèle résultant est moins générique. Un exemple décrivant cette méthode est montré sur la figure 1.17. On peut remarquer l'effet du gonflement des muscles au niveau d'articulation des bras.

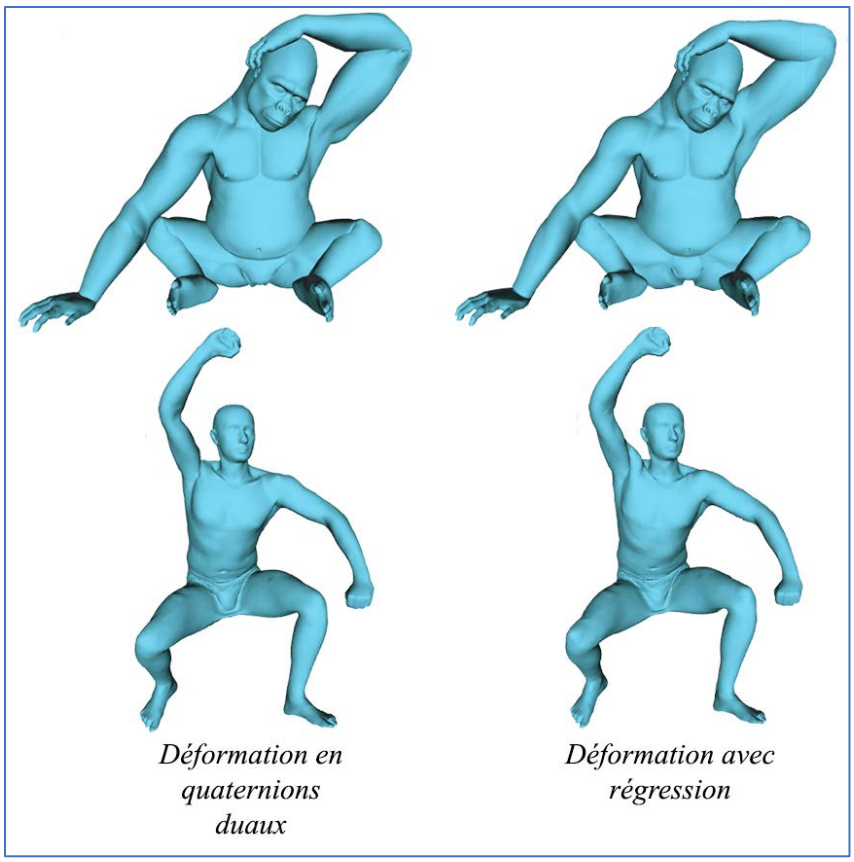


Figure 1-17 : Résultats de méthode d'apprentissage proposée par [151] appliquée sur des caractères animés

Certaines approches d'apprentissages récentes sont utilisées également dans la modélisation en temps réel des animations de vêtements avec des plis [140,59,71]. Comme avantage, ces approches permettent une animation rapide et assurent une apparence plausible de la surface déformée. Cependant, leur utilisation est liée à deux problématiques principales :

- Faible contrôle sur la surface déformée.
- La création de la base de données des formes d'apprentissage.

En effet, toutes les déformations générées à l'aide d'une telle méthode doivent forcements appartenir à l'espace des formes de base ou d'apprentissage. Par exemple, une base de formes de

personnage articulé qui marchent ne sera pas possible d'être utilisée pour générer un mouvement de course. Par conséquent, il est nécessaire de concevoir l'ensemble des formes pour chaque type de déformation, ce qui rend ces approches peu applicables pour la génération des déformations arbitraires.

1.4.5. Déformation directe de surfaces

Ce type de déformation est basée sur l'idée d'analyser les caractéristiques de la surface de l'objet afin d'en décider le type de la transformation la mieux adaptée. À l'aide d'une telle approche, l'artiste peut choisir le type de la déformation en fonction des caractéristiques de la surface. Ainsi par exemple, une surface cubique ne sera pas transformée de la même façon qu'une surface plane. Bien que cette catégorie d'approche de déformation assure un contrôle direct sur la surface pour le cas de modélisation de formes libres, elle est moins adaptée pour le cas d'animation des personnages articulés, et les méthodes de simulation pour l'animation de vêtements. Dans la suite nous allons présenter deux méthodes de cette catégorie ainsi que leurs applications.

1.4.5.1. Déformation par subdivision de surfaces

La méthode de subdivision est devenue un outil standard dans les logiciels de simulation graphique, elle est utilisée principalement dans la modélisation multi-échelle. Dans le contexte d'une déformation et animation, l'intérêt de cette méthode consiste en sa capacité de manipuler parfaitement des maillages d'une forme grossière, ainsi d'appliquer la déformation sur l'ensemble des résolutions fines du maillage. Cette méthode offre ainsi la possibilité d'effectuer une déformation sur différents niveaux de détails du maillage : la déformation d'une partie du corps de personnage ou la déformation locale d'un muscle (figure 1.18). La modélisation par surface de subdivisions est initiée par Catmull et al. [31] et Loop et al [97] pour le domaine de conception assistée par ordinateur CAO. L'utilisation de cette méthode est introduite par [11, 41] dans la déformation rapide et les logiciels d'animation professionnels.

Le principe de la modélisation par subdivision est principalement itératif en deux étapes :

1. Subdivision de la structure du maillage, indépendamment de la topologie géométrique.
2. Positionner les anciens sommets de la surface et les nouveaux sommets crées dans la première étape, en se basant sur les informations locales des coordonnées des anciens sommets.

Récemment, les surfaces de subdivisions font une partie intégrante dans de nombreux logiciels de modélisation, et plusieurs sujets de recherche sont publiés dans ce contexte [95].

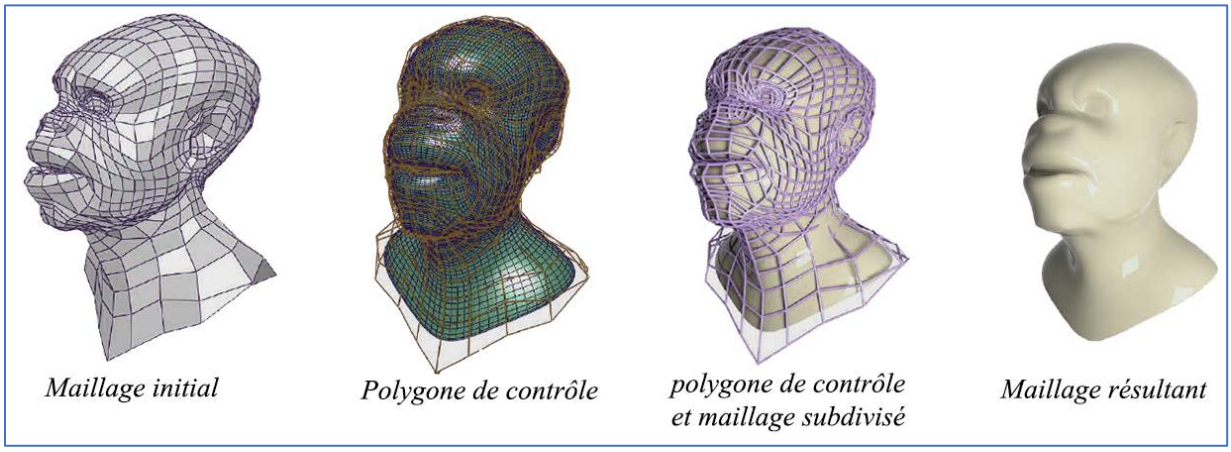


Figure 1-18 : Exemple de processus de subdivision du maillage polygonal

La méthode de déformation à l'aide de subdivision présente quelques inconvénients :

- Les surfaces de subdivision ne disposent pas d'une paramétrisation sous-jacente bien déterminée, ou du moins elle est complexe à calculer. Ce qui rend l'utilisation de ce type de surface impossible pour des opérations classiques comme l'intersection, la découpe ou le raccordement.
- Le résultat d'une opération de subdivision est difficile à contrôler. En effet, ceci dépend des deux étapes de subdivision qui changent le positionnement des sommets ainsi que leur connectivité. Par conséquent, deux surfaces identiques avec une connectivité différente se convergent vers différentes surfaces après une opération de subdivision.
- Finalement, une méthode de subdivision est particulièrement souhaitable en tant qu'étape de post-traitement pour améliorer la qualité de la surface résultante.

1.4.5.2. Déformations par coordonnées différentielles

Une méthode d'encodage de surface en maillage est devenue plus adaptée à réaliser des déformations arbitraires. Le système d'encodage différentiel permet de profiter davantage des géométries différentielles applicables dans le cas des maillages polygonaux. Pour plus de détails de ce contexte le lecteur peut consulter l'étude effectué par Crane Keenan [38].

Le principe de cette méthode est de définir la surface par une représentation intrinsèque au lieu d'utiliser ses coordonnées cartésiennes dans l'espace. Par exemple, la représentation à l'aide de

coordonnées de Laplacienne permet de décrire la surface localement d'une manière différentielle [132,106].

La propriété linéaire des coordonnées différentielles, permet de définir un système global matriciel creux facile à minimiser. Ainsi, en utilisant des algorithmes de résolution de système linéaires creux on peut obtenir le maillage déformé. Par conséquent, les sommets du maillage seront positionnés dans l'emplacement souhaité tout en gardant les propriétés différentielles apportées par les coordonnées de Laplacienne (figure 1.19). Pour approximer plus précisément le Laplacien du maillage, Masuda et al. [103] proposent d'utiliser des coordonnées cotangentes en se basant sur l'idée de Pinkall et Polthier [112].

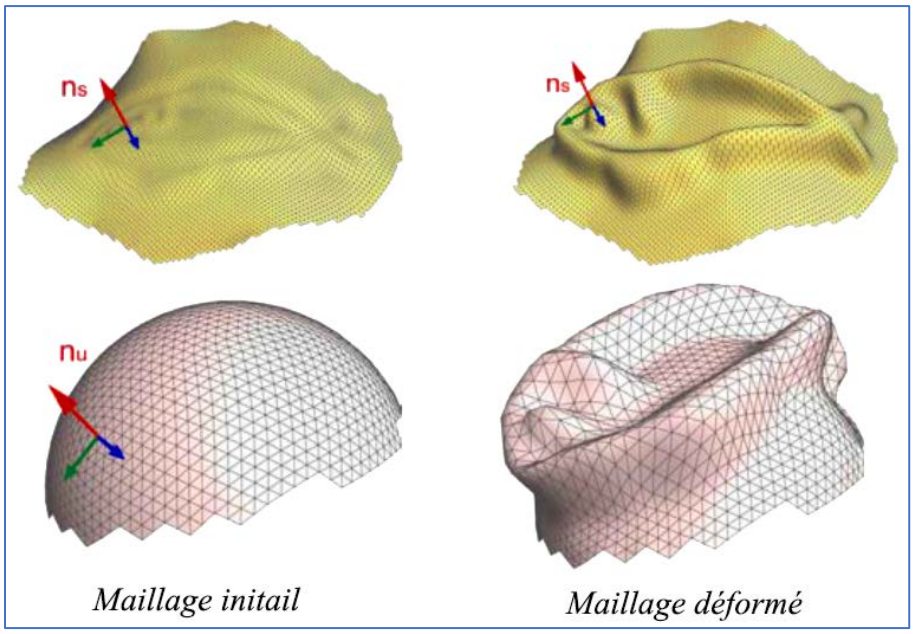


Figure 1-19 : Illustration de déformation basée sur les coordonnées différentielles [132]

1.5. Déformation sous contraintes

Dans les paragraphes précédents, nous avons présenté un certain nombre de méthodes de déformations standard, utilisée dans les outils professionnels afin d'animer des personnages et des objets virtuels. En utilisant ces méthodes, il est impératif que l'artiste réalise un compromis entre l'un des critères suivants :

1. Avoir une plausibilité d'apparence.
2. Avoir une rapidité de réalisation.
3. Être libre dans le contrôle du résultat final.

Bien qu'une déformation effectuée avec des méthodes physiques ou l'enrobage garantie la rapidité d'exécution et un degré de contrôle sur le résultat final, elle n'assure pas la plausibilité visuelle du modèle déformé. En effet, certains aspects géométriques de la surface telle que la préservation du volume, nécessitent des étapes de corrections effectuées manuellement pour avoir le résultat souhaité. Dans l'objectif de faciliter ces tâches de correction fastidieuses, un ensemble de méthodes alternatives ont été proposées. Dans la suite nous présentons certaines de ces méthodes.

1.5.1. Contraintes de longueurs

Les vêtements sont des objets particuliers, ils sont particulièrement constitués d'un enchevêtrement de fibres inextensibles. Ils possèdent la propriété de ne pas ni s'étendre ni se contracter. Une modélisation plausible d'un vêtement virtuel repose sur la présence des plis qui apparaissent et disparaissent dynamiquement au cours de l'animation (figure 1.20).

Dans la suite nous traitons les méthodes de préservation de longueur qu'ont pour objectif la modélisation de tissu virtuel en animation, tout en résolvant la problématique suivante : simuler et déformer d'une manière optimale les vêtements avec des plis dynamiques. Ainsi que les plis résultants soient générés par une approximation de préservation de longueur.



Figure 1-20 : Modèles de vêtements virtuels utilisés en production cinématographique et jeux vidéo ; (À gauche) image issue de film d'animation Tangled [133] ; (À droite) image issue de jeu vidéo Assassin's Creed Syndicate [159]

1.5.1.1. Définition et caractéristiques des isométries

1.5.1.1.1. Définition d'isométrie

Les vêtements en générale sont créés à l'aide de patron de forme planaire. Ainsi on peut considérer un tissu virtuel comme étant une surface 3D générée par la transformation d'un plan

D (patron) en surface S. Cette transformation est effectuée à l'aide d'une fonction isométrique g :

$$g\begin{cases} D \in \mathbb{R}^2 \to S \in \mathbb{R}^3 \\ p(x,y) \to g(p) \end{cases} \quad (1.12)$$

Une fonction est dite isométrique si elle préserve les longueurs, c'est-à-dire que toute courbe dans le plan D est transformée en courbe de même longueur dans la surface S (figure 1.21).

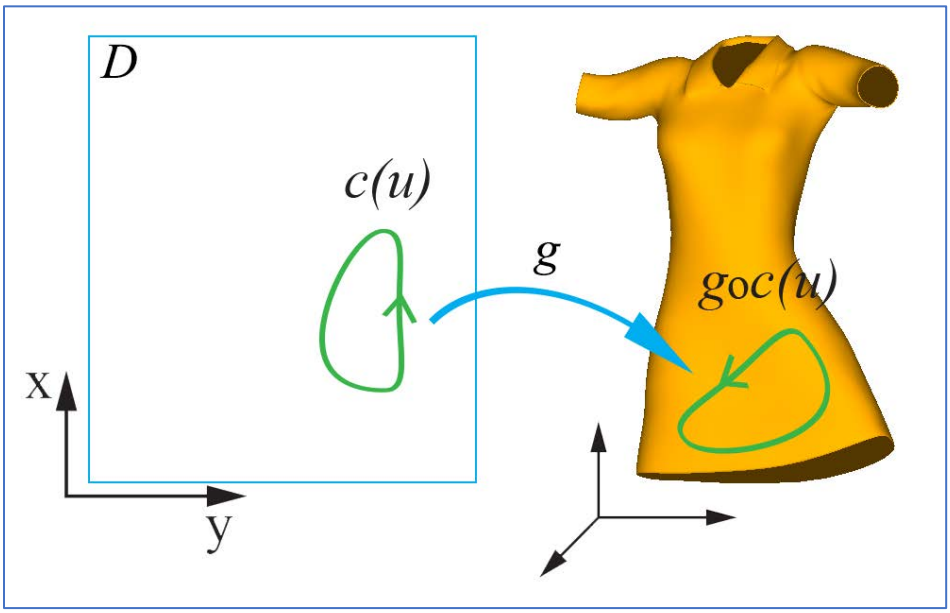


Figure 1-21 : Transformation d'une courbe dans le plan en courbe dans la surface de vêtement

Pour le cas d'un maillage triangulaire, on peut exprimer l'isométrie de manière équivalente par le respect des longueurs des arêtes des polygones : soit A l'ensemble des arêtes d'un maillage triangulaire. Pour tous $(i,j) \in A$ la fonction isométrique g est définie par :

$$\|p_j - p_i\| = \|g(p_j) - g(p_i)\| \quad (1.13)$$

La mesure permet de calculer seulement le taux de préservation globale de l'isométrie et non pas la préservation locale. On note qu'elle s'adapte directement à la déformation à base de modèle masses-ressorts (paragraphe 1.3.2). Ainsi qu'elle est dépendante de la triangulation sous-jacente.

1.5.1.1.2. Définition de surface développable

Une surface développable est définie comme étant une surface isométrique qui possède une courbure Gaussienne nulle en tout point [83]. Les caractéristiques qui définissent une surface développable S sont les suivantes :

1. Il existe une fonction g isométrique avec une continuité C^2.
2. La fonction $g : D \to S$ peut s'exprimer par la forme suivante :

$$\begin{cases} g(u,v) = f_1(u) + vf_2(u) \\ \det\left(f_1', f_2, f_1'\right) = 0 \end{cases} \qquad (1.14)$$

   C'est-à-dire que S est une *surface réglée* qui est générée à l'aide d'une droite ou une courbe qui se déplace dans l'espace selon une règle donnée à priori.
3. La courbure Gaussienne est nulle en tout point.

Pour le cas d'un maillage polygonal, on utilise une courbure de Gauss discrète [38]. Un maillage représenté à l'aide d'une approximation de surface développable peut être décrit entièrement sans aucun sommet intérieur. En effet, les arêtes pouvant se placer sur les règles de la surface, les sommets du bord et leurs connectivités définissent entièrement cette surface [123].

En se basant sur les définitions (préservation d'isométrie ou de surface développable) plusieurs approches de modélisation et d'animation ont été proposées dans le domaine graphique.

1.5.1.2. Animation de plis de vêtements

Les vêtements virtuels sont devenus plus présents dans le domaine de cinéma d'animation et des jeux vidéo. Au cours des dernières décennies, la simulation du comportement des vêtements portés par les caractères des personnages virtuels a été un sujet intéressant pour la communauté de recherche graphique. Les plis des vêtements représentent un phénomène mécanique complexe. Ce phénomène est caractérisé par des comportements non linéaires et par un niveau de dynamique très élevé. En dépit de multiples années de recherche, la modélisation efficace et réaliste de déformation de tissu reste complexe. Le standard dans l'informatique graphique pour effectuer une modélisation ou une déformation d'un objet quelconque, est d'utiliser des méthodes basées sur des lois physiques [66]. Ces méthodes peuvent produire des résultats visuellement plausibles, ainsi de calculer des effets dynamiques et de gérer des collisions entre des modèle 3D dans une même scène. Cependant, le temps de calcul nécessaire pour exécuter ces méthodes rend

souvent leur utilisation difficile dans le cadre d'une simulation de plis de vêtements [35]. L'absence de contrôle direct sur la forme finale de plis oblige l'utilisateur à relancer la simulation pour de nombreuses reprises avec différents paramètres afin de se rapprocher du résultat souhaité.

Actuellement, de nombreuses approches ont déjà été proposées dans l'objectif de générer des vêtements inextensibles avec des plis. Ces approches peuvent être classées en trois catégories principales : des méthodes basées sur l'ajout de contraintes supplémentaires dans une simulation physique, des méthodes à base d'optimisation globale et les méthodes géométriques.

1.5.1.2.1. Méthode basée sur ajout de contraintes

La méthode proposée par [115] est l'une des méthodes physiques avec des contraintes supplémentaires pour la modélisation de vêtements virtuels. Cette méthode est basée sur le principe d'introduire une contrainte de limitation d'extension des longueurs des arêtes du maillage en masses-ressorts, cela est effectué à l'aide d'une projection géométrique itérative des sommets. Cette méthode est facile à implémenter, par contre la convergence de la projection géométrique n'est pas optimale.

Une approche de résolution appelée *(FPM Fast projection method)* proposée par Goldenthal et al. [52] pour améliorer la notion de projection géométrique en l'intégrant avec la multiplication de Lagrange. Cette approche permet de générer des maillages avec des plis et possède une isométrie approchée comme il est illustré sur la figure 1.22.

Kang et al. [73] proposent une approche de génération de plis sur un maillage à basse résolution. Le principe de cette méthode est d'utiliser une variation sinusoïdale sur des splines sous forme de carreau. Larboulette et Cani [85] ont adopté une approche similaire avec des courbes paramétriques de plis. Cependant ces deux approches précédentes ne garantissent pas la préservation de longueur.



Figure 1-22 : Simulation quasi inextensible de deux modèles de vêtements [52]

Muller et al. [108] proposent une approche basée sur l'introduction d'un second solveur pour déplacer les sommets du maillage après une subdivision afin de préserver la contrainte de longueur. [78] proposent une méthode de simulation de tissu hiérarchique, qui combine la simulation physique conventionnelle avec des réseaux de neurones profonds.

Récemment, Li et al. [90] proposent une méthode pour gérer le contact du tissu basé sur le frottement coulombien exact. Cette méthode permet de créer des plis de tissu en traitant les interactions tissu-tissu et tissu-corps. Ces méthodes génèrent des résultats des plissements impressionnants et modélisent divers types de vêtements avec une grande précision (figure 1.23). Cependant, ces résultats nécessitent des compétences spécifiques de la part de l'utilisateur pour régler les paramètres physiques, et ils sont très coûteux en calcul.



Figure 1-23 : Simulation de vêtements à l'aide de frottement coulombien exact [90]

1.5.1.2.2. Méthodes basées sur l'optimisation

D'autres approches utilisent une optimisation d'énergie évaluant la développabilité de la surface de tissu. Elles permettent d'obtenir des plis qui sont visuellement plausibles et assurent un contrôle aisé du résultat final. Dans ce cadre, Wang et Tang [141] proposent de modéliser une surface quasi-développable à partir d'une surface, en utilisant une minimisation d'énergie basée sur l'erreur de courbure de Gauss. Chen et al. [33] propose une approche similaire dont le principe est d'ajouter des contraintes de positions à la fois sur quelques sommets de la surface résultante, et sur l'action de gravité. Cette approche permet de générer une surface quasi-développable, ainsi qu'elle est manuellement contrôlable, et les plis résultants sont localisés automatiquement (Figure 1.24).

La proposition de Popa et al. [114] introduit une contrainte spatio-temporelle appliquée sur une capture vidéo de vêtements animés. La minimisation dans cette méthode est effectuée sur la propriété de développabilité et sur l'orientation des normales sur les sommets du maillage, en fonction d'une analyse de la vidéo d'entrée. Cependant, une telle approche d'optimisation est excessivement coûteuse en termes de temps de calcul, en plus elle requit une vidéo en entrée.

On note que ces approches basées sur l'optimisation apportent à l'artiste un degré de contrôle bénéfique sur la forme générale de la surface générée par rapport aux autres approches de simulation physique pure. Cependant, elles sont coûteuses en temps de calcul et en mémoire du travail, ainsi que le contrôle direct sur la forme locale des plis reste encore difficile.

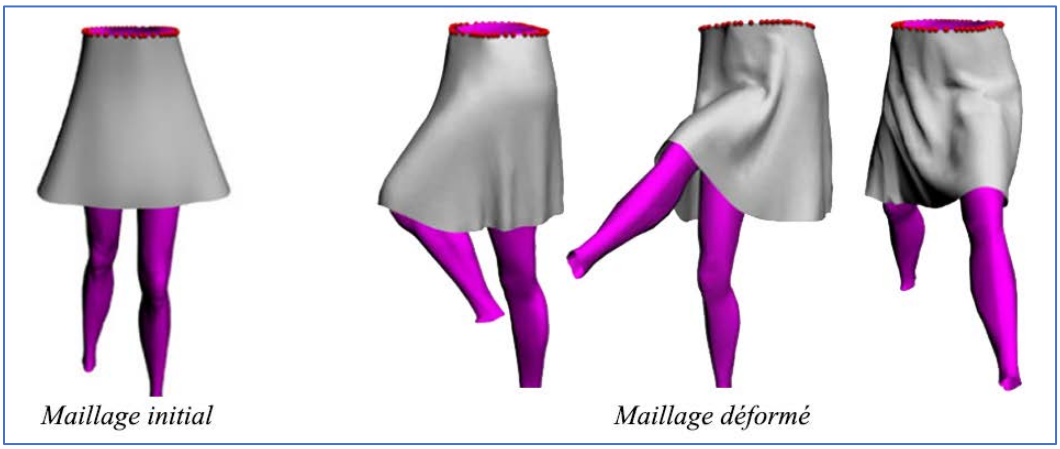


Figure 1-24 : Déformation par optimisation d'un modèle de jupe [33]

1.5.1.2.3. Méthodes géométriques

Les approches géométriques sont proposées afin de réduire le cout de calcul de l'ajout de plis sur la surface des vêtements virtuels. Elles reposent sur le principe de générer ces plis à partir des informations géométriques de la surface.

- ***Simulation de plis à l'aide des formes géométriques prédéfinies***

Decaudin et al. [40] proposent une approche procédurale qui permet d'enrouler des plis autour d'une surface de tissu en forme cylindrique. Ceux-ci sont alors générés sur le maillage par une déformation connue d'avance. Cette approche est applicable en temps réel, ainsi elle assure à l'artiste un contrôle sur la forme finale des plis générés. Cependant, elle est adaptée seulement aux vêtements ayant un maillage de forme cylindrique, ainsi qu'elle ne peut pas modéliser certains types de plis causés par des déformations spécifiques comme la compression ou la torsion (figure 1.25 (a)).

Récemment, Han et al. [60] proposent une méthode basée sur des réseaux de neurones convolutifs pour l'intégration des plis issus des images de vêtements réelles. Cependant, cette méthode est limitée par l'information issue de l'image statique et la position fixe de caméra. En effet, elle ne fournit pas un rendu 3D parfait du maillage de vêtements. Santesteban et al. [124]

proposent un modèle basé sur l'apprentissage des plis suivant la dynamique du corps. Cependant une telle méthode d'apprentissage est limitée par la taille de la base des échantillons utilisée.

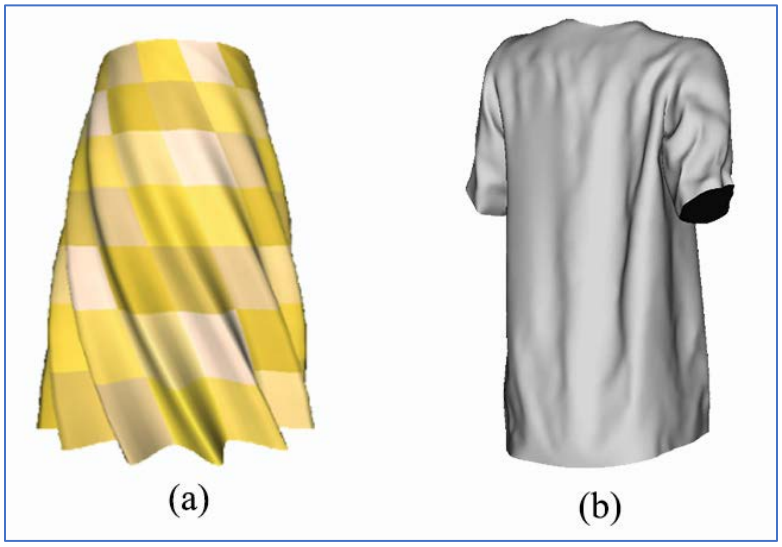


Figure 1-25 : Plis simulés sur deux modèles de vêtement ; (a) Exemple issu de [40] ; (b) Exemple issu de [80]

– ***Intégration de plis au niveau de texture***

Les approches proposées par [57] et [80] consistent à utiliser une texture précalculée à l'aide d'une carte d'intensité de plis. Cette texture est ensuite appliquée sur le maillage de tissu pour donner l'impression d'un vêtement plissé. Bien que cette approche puisse être appliquée sur une animation du vêtement quelconque, elle requit une interpolation avec une base de textures prédéfinies. La création d'une telle base est ainsi une tache fastidieuse. (Figure 1.25 (b) ci-dessus).

– ***Traçage manuelle de plis***

Cutler et al. [39] proposent une approche d'ajout manuel des plis sur la surface du vêtement. Les plis dans ce cas sont générés à l'aide d'une déformation locale suivant une courbe tracée par l'artiste sur la surface du modèle (figure 1.26). Wang et al. [150] proposent un système de modèle pré-simulé qui permet à l'utilisateur de dessiner l'apparence du vêtement souhaité. Ces méthodes assurent un grand contrôle sur les plis résultants, mais elle demande beaucoup d'expertise pour déterminer l'emplacement adéquat des plis, et pour les animer de manière plausible au cours du temps. En plus, la modélisation manuelle de plis requit toujours un temps très important pour qu'elle soit réalisée.

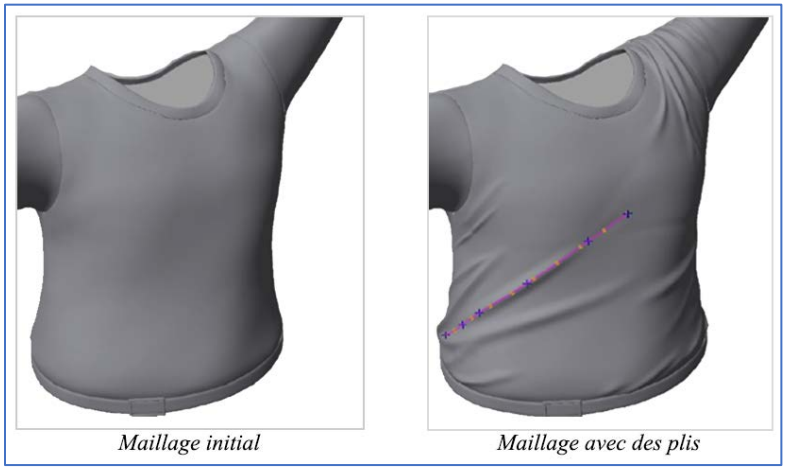


Figure 1-26 : Exemple de courbe de plis dessinés manuellement sur la surface du vêtement [39]

1.5.2. Préservation de volume

La préservation de volume constant lors de la déformation caractérise plusieurs objets réels. Particulièrement, les membres du corps humain et animal maintiennent localement un volume constant à cause de leur constitution (composée principalement de l'eau). Pour avoir une apparence réaliste des personnages virtuels, il est indispensable d'assurer cet aspect de préservation du volume englobé par leur surface [86].

Pratiquement, lors de la déformation d'un objet virtuel, il est difficile d'accéder directement à l'information sur le volume engobé. En plus, la déformation à l'aide des méthodes standard telles que l'enrobage, ne permettent pas la préservation du volume. Certaines propositions adoptent le principe d'ajouter des contraintes géométriques sur la surface de l'objet pour préserver son volume lors de la déformation.

Dans la suite de ce paragraphe, nous détaillons les différentes approches proposées pour surmonter le problème de préservation du volume d'une surface.

1.5.2.1. Déformation de forme libre (FFD)

Les approches de déformation de forme libre s'inscrivent dans le cadre des approches de déformation géométriques. Dans le contexte de préservation de volume, Rappoport et al. [117] proposent une méthode qui permet d'exprimer le volume du maillage à l'aide de fonctions de Bézier. Hirota et al. [63] définissent également une méthode de FFD qui permet de contrôler le volume du maillage à l'aide d'une cage de déformation.

On peut noter que ce genre d'approche assure une préservation de volume global uniquement. Ainsi, une déformation locale peut avoir un rebondissement sur la forme globale de la surface, ce qui n'est donc pas adapté au cas d'animation d'un personnage articulé. En plus, le contrôle d'utilisateur sur la forme finale est très difficile.

1.5.2.2. Manipulation par contraintes

Certaines approches permettent d'introduire une préservation de volume lors de la déformation par surface afin d'améliorer l'apparence visuelle du résultat. Shi et al. [129] proposent une contrainte basée sur optimisation intégrée de la position de squelette d'animation à l'aide de la résolution du système en coordonnées différentielles. Bien que cette approche permet de limiter une perte visuelle volumique trop importante, elle n'assure pas une préservation totale de volume. Zhou et al. [158] introduisent un modèle tétraédrique construit à partir de l'information de la surface, ensuite ils appliquent une minimisation Laplacienne directe sur le volume de l'objet (figure 1.27).

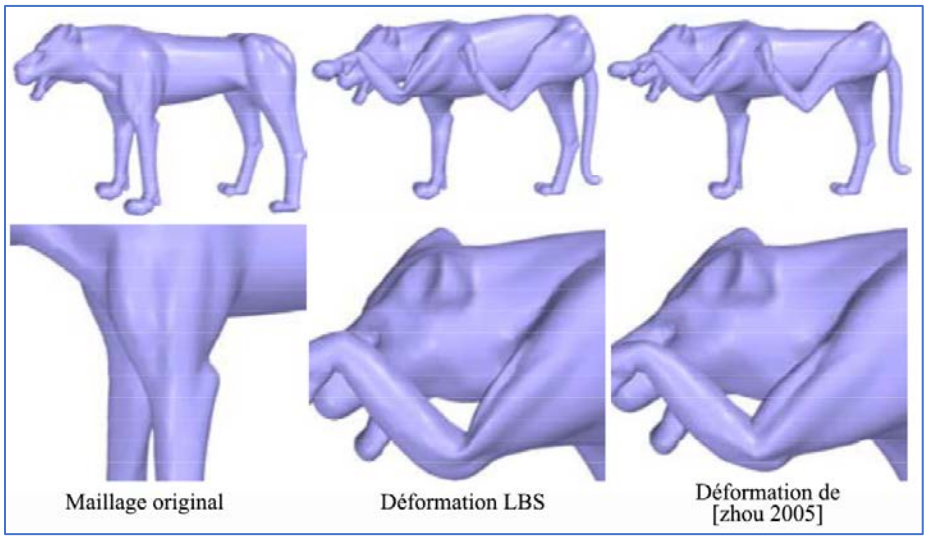


Figure 1-27 : Exemple de préservation de volume par déformation Laplacienne volumique [158]

1.5.2.3. Surfaces implicites à squelette

Cani et al. [29] proposent une méthode pour contrôler le volume d'une surface implicite. La correction de volume est effectuée dans des régions dans lesquelles un nombre de particules sont placées, le degré de correction est défini par l'action de ces particules. Principalement, ces particules sont positionnées au centre de ces régions ainsi que dans les extrémités de l'objet. Lors de la déformation, les positions des particules sont pistées pour déduire la variation de volume de

l’objet. À chaque instant, le champ potentiel générant la surface implicite est déformé suivant une équation différentielle, ce qui permet de limiter la perte de volume. On peut noter que la correction adoptée par cette méthode est très sensible aux erreurs numériques de calcul.

1.6. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté quelques définitions et approches de modélisation et de déformation d'un modèle 3D. Tout d’abord, nous avons détaillé les méthodes de modélisation par surface qui constitue une étape primordiale pour la réussite d'une animation 3D. Ensuite nous avons présenté un état d’art sur les différentes approches de déformations de surfaces. De plus, nous avons expliqué en détail les avantages et les inconvénients de chaque méthode de déformation. Par ailleurs, nous avons abordé les travaux antérieurs réalisés dans le cadre de la déformation avec préservation de propriétés intrinsèques des surfaces particulières, comme les vêtements et la peau.

Chapitre 2

Nouvelle méthode de synthèse de plis sur un maillage de tissu à l'aide des fonctions à base radiale d'Hermite

2.1. Introduction

En dépit de nombreuses années de recherches, la simulation efficace et réaliste de déformation de tissu reste un sujet intéressant pour la communauté de l'informatique graphique. Les détails sur la surface de vêtements représentent un phénomène mécanique complexe. Ce phénomène est caractérisé par des comportements non linéaires et par un niveau de dynamique élevé.

Bien que les approches de déformation physiques permettent de générer des détails dynamiques tout en tenant compte des collisions, la simulation précise de plis nécessite un temps de calcul coûteux. L'animation de plis reste cependant un critère indispensable pour rendre plausible l'apparence des séquences de jeux vidéo et de film d'animation 3D, mais le temps de calcul requis pour réaliser la simulation empêche souvent l'utilisation de ces approches. En effet, la production des jeux vidéo nécessite des systèmes de déformation temps-réel et la simulation basée sur les méthodes physiques n'est pas un choix approprié dans ce contexte. En production cinématographique, le temps de calcul ne soit pas une obligation principale, mais l'absence de contrôle artistique direct du résultat final obtenu, oblige les utilisateurs à relancer les simulations à de nombreuses reprises, avec différents paramétrages, dans le but de se rapprocher des résultats visuels souhaités. Finalement, les approches basées sur les lois physiques brutes demandent un investissement prohibitif en temps machine et en paramétrage manuel des données d'entrée.

Des méthodes de simulation des plis basées sur l'interpolation d'échantillons préexistants ont été proposées en alternative, pour surmonter les problèmes liés aux méthodes physiques [148, 140]. Cependant, ces approches nécessitent un travail artistique fastidieux pour réaliser la base de données de plis. De plus, le contrôle direct du modèle final semble difficile. Ainsi, les méthodes d'augmentation géométriques sont des approches de post-traitement qui utilisent l'analyse de compression pour ajouter des plis au maillage du tissu [43, 122]. Suite à l'étude analytique

présentée dans l'annexe A, ces méthodes nécessitent des compétences spécifiques et beaucoup de temps pour concevoir les motifs de plis. Dans le but d'améliorer ces méthodes d'augmentation géométriques, nous avons proposé une nouvelle méthode de synthèse de plis sur le maillage du vêtement [23].

L'idée de cette proposition est basée sur l'observation que le comportement des plis est fortement lié à la capacité de développement du tissu, et à une quasi-isométrie entre le vêtement et le mouvement du corps. La principale nouveauté de cette méthode est d'utiliser les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF) [99] pour reconstruire une approximation par morceaux du maillage du vêtement. Cette approximation est ensuite employée comme guide de traçage des courbes de plis.

Ce chapitre est organisé comme suit : le paragraphe 2.2 présente un aperçu général de la méthode d'ajout de plis proposée. Le paragraphe 2.3 expose le principe de déformation du vêtement adopté. Dans le paragraphe 2.4, nous détaillons le processus de génération de plis sur le maillage du vêtement déformé. Dans le paragraphe 2.5, nous présentons les résultats des simulations avec la méthode d'ajout de plis ainsi que les comparaisons avec les autres méthodes alternatives.

2.2. Principe général de l'approche d'ajout de plis

Dans ce paragraphe, nous présentons le principe de l'approche de création et animation des détails de vêtements. Une vue générale des différentes étapes de l'approche est présentée sur la figure 2.1. Ce travail est basé sur l'observation que l'apparence des plis dépend largement des impacts que le corps exerce sur la surface du tissu. En fait, l'observateur humain s'attend à ce que des plis apparaissent lorsque la surface des vêtements au niveau des articulations se contracte, et de même à ce qu'elles disparaissent lorsque la surface s'étire après la contraction. Suite à cette observation, nous sommes motivés par l'analyse de la déformation locale et intrinsèque de la surface au niveau des articulations pour prédire l'apparence souhaitée des plis. Pour l'analyse de déformation du vêtement, nous avons utilisé des représentations implicites qui sont connues par leur capacité à détecter des collisions et à modéliser le contact entre des surfaces, ainsi pour leur capacité à être composées par de nouvelles surfaces.

Le pipeline du système proposé est organisé comme suit : les données d'entrée sont un maillage du vêtement porté par un personnage et un squelette d'animation. Le maillage du tissu est partitionné en utilisant une segmentation basée sur la distance des sommets du maillage par

rapport au squelette. (Paragraphe 2.3.1). À partir de ces configurations initiales, nous effectuons une approximation HRBF pour chaque segment du maillage avec une iso-valeur du champ potentiel égale à 0.5 (Paragraphe 2.3.2). Lors de la déformation de tissu, chaque champ potentiel est rigidement transformé et les sommets du maillage correspondants sont déplacés dans la direction du gradient du champ jusqu'à ce qu'ils atteignent leur valeur iso de l'état initial (Paragraphe 2.3.3). En utilisant les angles entre les gradients de ces champs potentiels transformés, nous traçons des courbes de plis cohérents en temps et en espace sur la surface du maillage (Paragraphe 2.4.2). Nous générons ensuite la forme géométrique des plis à l'aide d'une déformation par surface implicite de convolution qui utilise les courbes tracées comme squelette de génération (Paragraphe 2.4.4).

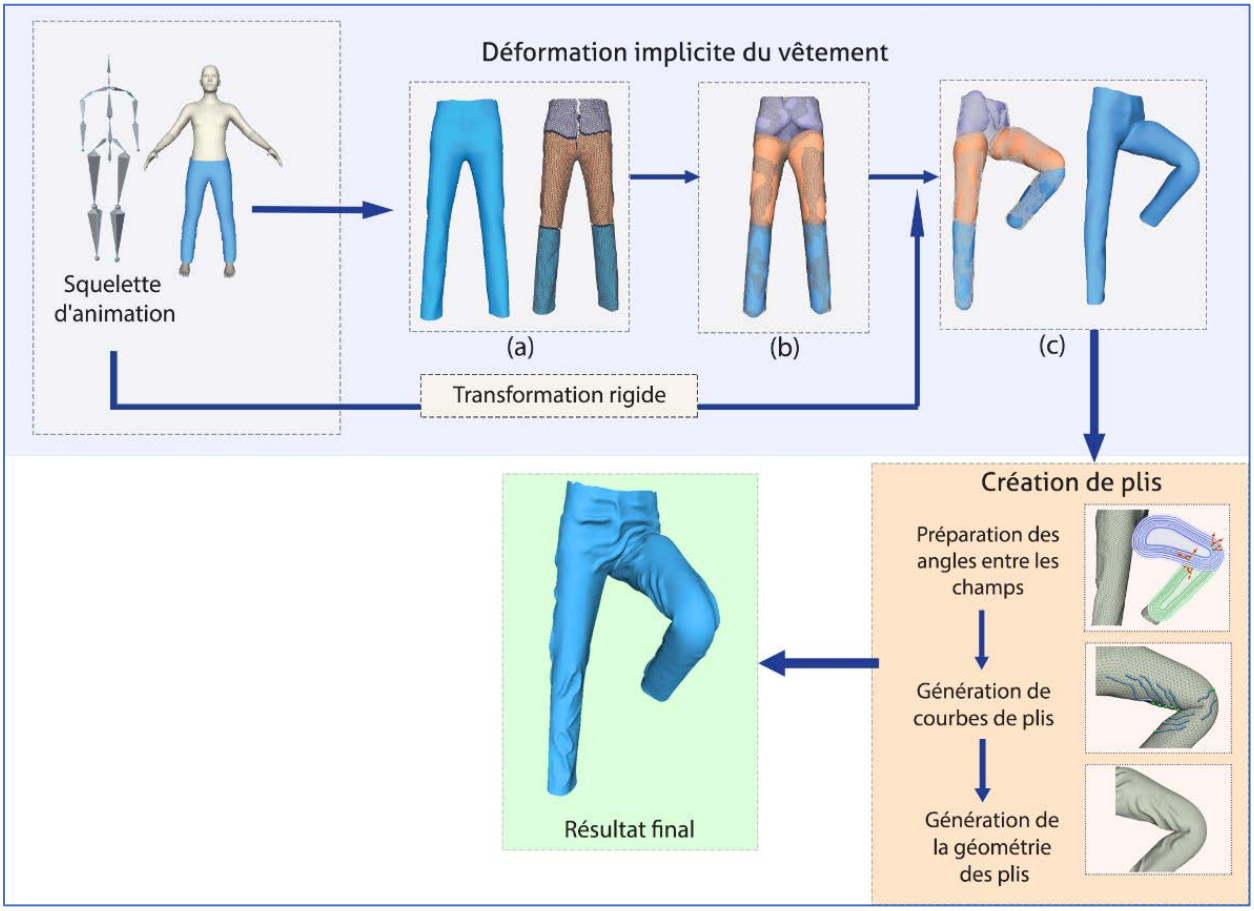


Figure 2-1 : Principe de la méthode d'ajout de plis à un vêtement porté par un personnage animé ; (a) partitionnement du maillage ; (b) l'approximation HRBF ; (c) déformation du maillage

2.3. Déformation implicite de vêtements

La déformation du maillage de tissu en utilisant l'approximation implicite basée sur les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF) est réalisée en quatre étapes :

1. Le maillage du tissu est partitionné en plusieurs régions, ainsi chacune est associée à un os du squelette d'animation ;
2. Les parties du maillage sont individuellement reconstruites en utilisant la méthode HRBF ;
3. Un champ potentiel global est construit par la composition des champs HRBF partiels ;
4. Le maillage est déformé en suivant l'iso-valeur du champ potentiel.

2.3.1. Partitionnement du vêtement

L'objectif principal de cette étape est de reconstruire le maillage du vêtement par morceaux qui sont délimités par les articulations du squelette. Pour cela nous avons besoin de partitionner le maillage initial. La méthode de partitionnement adoptée est inspirée de l'algorithme de Li et al. [91] qui utilisent le squelette d'animation pour en déduire les différentes partitions. Ce processus se déroule en deux étapes :

- **Première étape**

Cette étape consiste à spécifier la visibilité de sommet par rapport aux os du squelette de la manière suivante : soient v_i un sommet du maillage, n_i normale à la surface du maillage en v_i et q_i la projection de v_i sur l'os b_j. On marque v_i comme visible depuis l'os b_j si $\overrightarrow{v_i q_i}.\vec{n} > 0$.

- **Deuxième étape**

Elle consiste à associer tout sommet du maillage avec l'os le plus proche dans le squelette : l'os b_j relatif à un sommet v_i est déterminé en minimisant la valeur d_i qui exprime la distance entre cet os et ses sommets visibles. Cette distance est calculée en utilisant la formule suivante :

$$d_i = \left\| j_1 + r_i \left(j_2 - j_1 \right) - v_i \right\| \quad (2.1)$$

avec j_1 et j_2 sont les positions de deux extrémités de l'os b_j (deux articulations), r_i est la longueur du segment défini par le sommet v_i et sa projection q_i. Cette longueur est calculée avec la formule suivante :

$$r_i = \frac{\left\|(v_i - j_1)(j_2 - j_1)\right\|}{\left\|j_2 - j_1\right\|^2} \qquad (2.2)$$

Pour assurer un bon partitionnement, la dernière étape est contrôlée comme suit : pour tout sommet v_i du maillage, soit v_j son sommet adjacent qui a la plus petite distance à b_i. Si v_i et v_j sont affectés aux différents os, ou la distance d_i associée à v_i est plus grande que celle de v_j, alors v_i est affecté à un os inapproprié. Pour résoudre ce problème, nous utilisons l'algorithme de parcours en largeur pour réattribuer b_i comme os relatif à v_i. Par conséquent, nous obtenons des segments du maillage utiles, car les petites régions seront fusionnées dans leur plus grande région adjacente.

Le processus ci-dessus, permet de partitionner grossièrement le maillage du vêtement en plusieurs régions, comme le montre la figure 2.2, où différents maillages partiels sont visualisés en différentes couleurs.

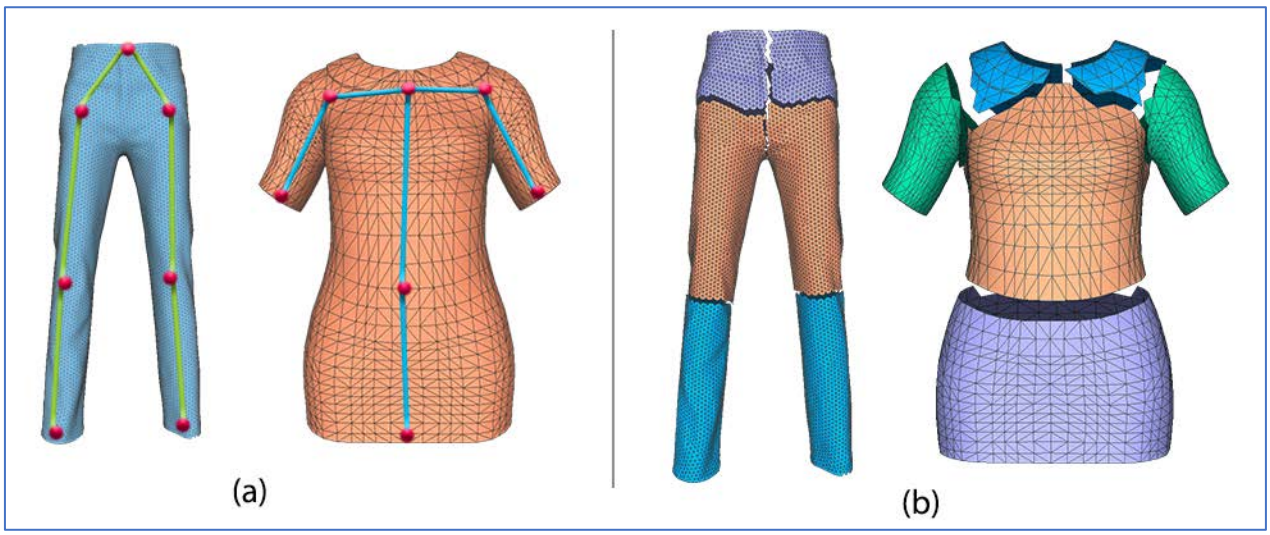


Figure 2-2 : Partitionnement de modèles de vêtements ; (a) Maillages avec squelette ; (b) les partitions des maillages résultants

2.3.2. Approximation du maillage de vêtement

Les HRBF sont un type de fonctions radiales qui interpolent naturellement des surfaces implicites lisses et fermées à partir d'un ensemble de points dispersés avec des directions de normales [99]. Ces fonctions sont très satisfaisantes pour l'interpolation de surface avec des variations subtiles, comme le corps du personnage. Nous avons adapté ces fonctions au contexte de simulation de plis de tissu en déformation, afin de réaliser une approximation implicite de tous les segments du maillage. Dans ce paragraphe nous allons détailler le processus que nous avons adopté (figure 2.3).

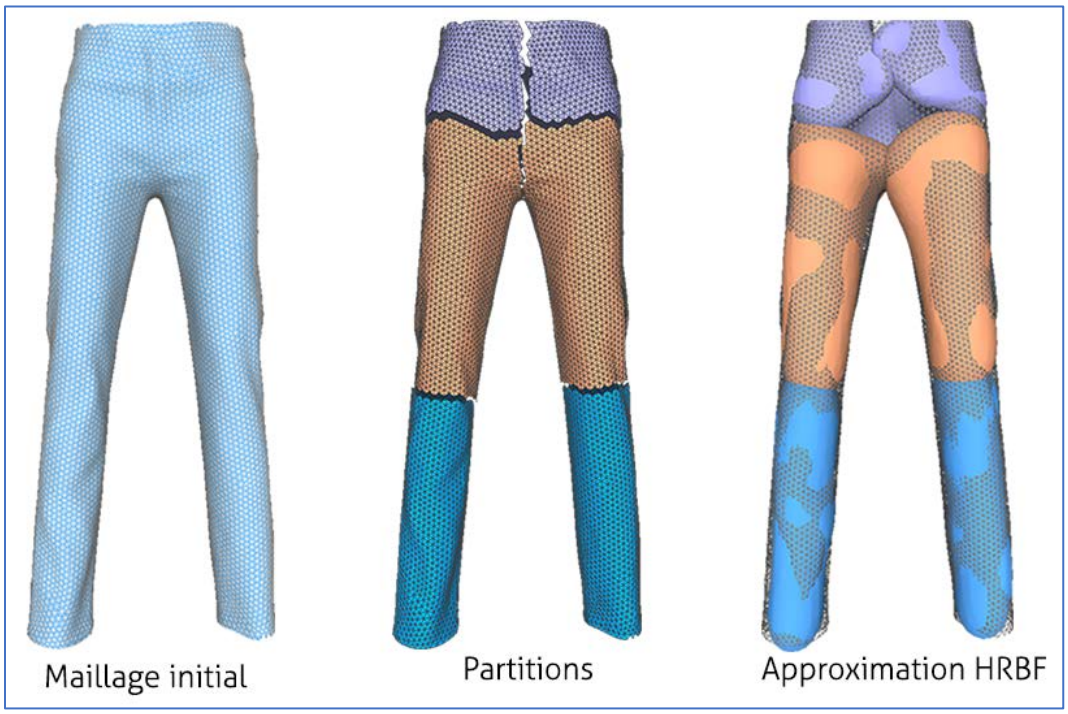


Figure 2-3 : Exemple d'approximation en HRBF du maillage de pantalon

Plus précisément, le processus d'approximation commence par l'échantillonnage de tout maillage partiel i avec un ensemble de N points de contrôle, en utilisant l'algorithme de "lancer de fléchettes" basé sur l'échantillonnage de *Poisson-disk* [145]. Un exemple d'utilisation de cet algorithme est illustré sur la figure 2.4.

Les points de contrôle sont utilisés pour calculer un champ potentiel d'approximation HRBF f_i défini par : $f_i : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$, tel que pour tout point de contrôle p_k et $\vec{n}_k$ la normale à la surface en

ce point, on a $f_i(p_k)=0.5$ et $\nabla f_i(p_k)=\vec{n}_k$. Le champ scalaire f_i permet de générer une surface implicite lisse définie par : $\{v\in\mathbb{R}^3 \mid f_i(v)=0.5\}$. Pratiquement, le champ f_i est implémenté comme une fonction à support compact en suivant deux étapes principales :

- **Première étape**

Nous commençons par une approximation du maillage partiel i en utilisant une iso-valeur égale à 0.5 pour reconstruire une fonction de distance globale g_i de la forme :

$$g_i(v)=\sum_{k=1}^{N}\left(a_k\phi\left(\|v-p_k\|\right)+\vec{c}_k\nabla\left(\phi\left(\|v-p_k\|\right)\right)\right) \quad (2.3)$$

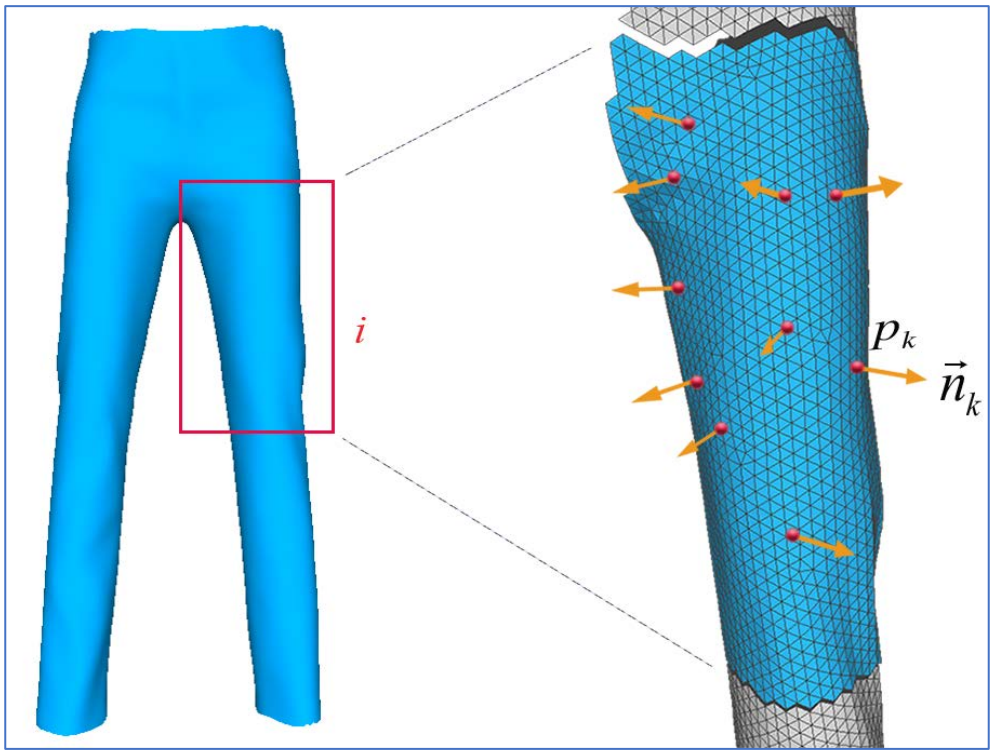


Figure 2-4 : Distribution de point de contrôle sur la surface d'un partie i du maillage

Avec la fonction ϕ est une spline poly-harmonique lisse telle que $\phi(x)=x^3$. La fonction g_i est exprimée comme étant une combinaison linéaire de fonctions à base radiale de ϕ dont la valeur ne dépend que de la distance à un point de contrôle, et le gradient en ce point. Les coefficients a_k et $\vec{c}_k$ sont généralement déterminés en résolvant le système linéaire suivant :

$$\begin{cases} g_i(p_k) = 0 \\ \nabla g_i(p_k) = \vec{n}_k \end{cases} \qquad (2.4)$$

En raison de la nature aléatoire de l'échantillonnage de Poisson, la forme de l'approximation HRBF générée devient très différente de la forme originale du maillage. Un tel problème surgisse généralement lors de l'échantillonnage des zones à haute résolution du maillage où les points échantillonnés peuvent se trouver sur des détails nets, ce qui engendre des distorsions de la forme. Heureusement, une fois que les points de contrôle HRBF soient échantillonnés, nous pouvons toujours les manipuler soit en modifiant leurs positions ou la direction des normales, soit en ajoutant ou supprimant des points de contrôle (points échantillonnés). Cela permet d'avoir une bonne approximation qui préserve la structure initiale du maillage.

Bien que les fonctions de distance signée soient un moyen intuitif pour représenter les distances, elles présentent certains inconvénients lorsqu'il s'agit d'une combinaison de plusieurs surfaces. Plus précisément, il est difficile de définir la localité à l'aide de ces fonctions. Un volume ne devrait influencer que son voisinage proche et ne devrait avoir aucun effet au-delà d'une certaine distance. Par conséquent, nous avons besoin d'une fonction avec un support local fini en convertissant le support infini des champs g_i.

- **Deuxième étape**

Le champ à support compact f_i est calculé en utilisant la transformation suivante :

$$f_i(v) = h_R(g_i(v)) \quad (2.5)$$

avec la fonction h_R est donné par la formule suivante :

$$h_R(x) = \begin{cases} 1 & si \quad x < -R \\ 0 & si \quad x > R \\ l(x/R) & si \quad x \in [-R, R] \end{cases} \qquad (2.6)$$

La fonction par morceaux h_R garantit la continuité C^2 en $h_R(x) = 0$ et $h_{-R}(x) = 1$. Avec la fonction d'interpolation $l(x) = -\frac{3}{16}x^5 + \frac{5}{8}x^3 - \frac{15}{16}x + \frac{1}{2}$. Et R le seuil de distance qui exprime la distance entre le point de contrôle p_k le plus extrême et l'os b_i associé au maillage partiel i,

nous avons choisi cette distance suite au fait que les parties de vêtements présentent généralement une symétrie de rotation approximative autour de leurs membres du corps humain associés et par la suite les os d'animation.

La fonction h_R permet de transformer les valeurs de champ de distance g_i défini dans l'intervalle $[-R,R]$ en valeurs dans l'intervalle $[0,1]$ tel que : $h_R(-R)=1$ et $h'_R(-R)=0$ définissent les valeurs de champ potentiel à l'intérieur du maillage. Et $h_R(0)=0.5$ représente les valeurs de champ potentiel sur la surface du maillage. Ainsi, $h_R(R)=h'_R(R)=0$ définisse les valeurs de champ potentiel à l'extérieur du maillage. La figure 2.5 représente la courbe d'évolution de la fonction de paramétrage h_R.

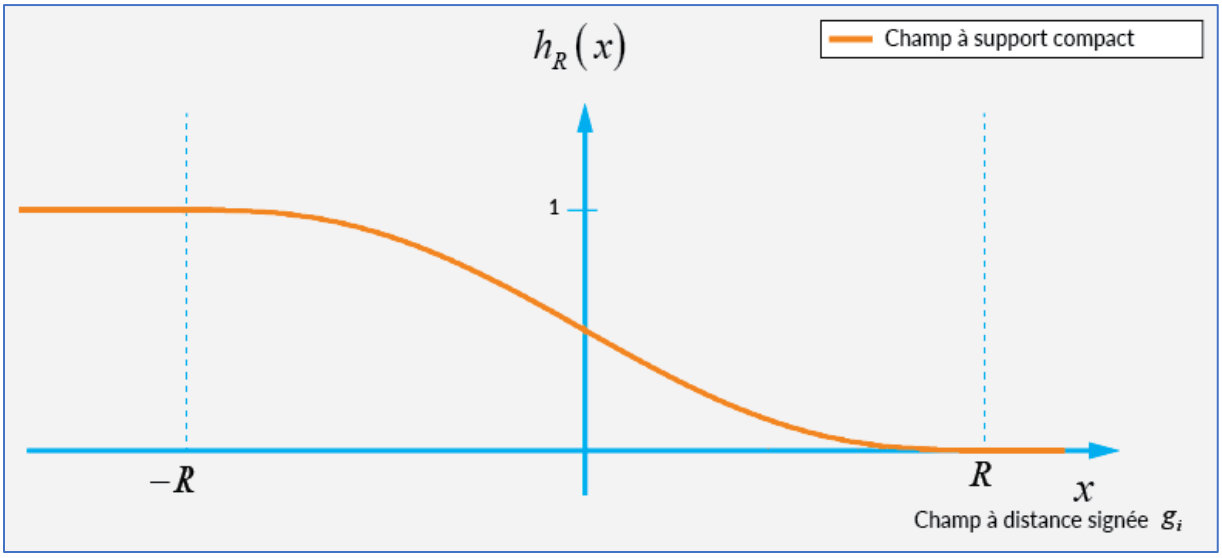


Figure 2-5 : Tracé de la fonction de re-paramétrisation

Pour accélérer l'évaluation de la fonction, chaque champ f_i est échantillonné dans la grille 3D. Les appels ultérieurs aux valeurs de f_i sont effectués par interpolation trilinéaire à l'intérieur de la grille d'échantillonnage. La figure 2.6 illustre deux exemples d'approximation HRBF des segments du vêtement et les surfaces implicites résultantes.

On note que dans certains cas, l'étape de partitionnement du maillage de tissu engendre des trous entre deux parties adjacentes au niveau d'articulation comme illustré sur la figure 2.7 (a) ci-après. Pour assurer une déformation crédible de tissu et par suite de créer des plis plausibles, la fonction

de champ f_i générée doit remplir correctement ces trous. Ceci est cruciale car deux surfaces voisines doivent être jointes sans introduire d'espaces ou de discontinuités de gradient.

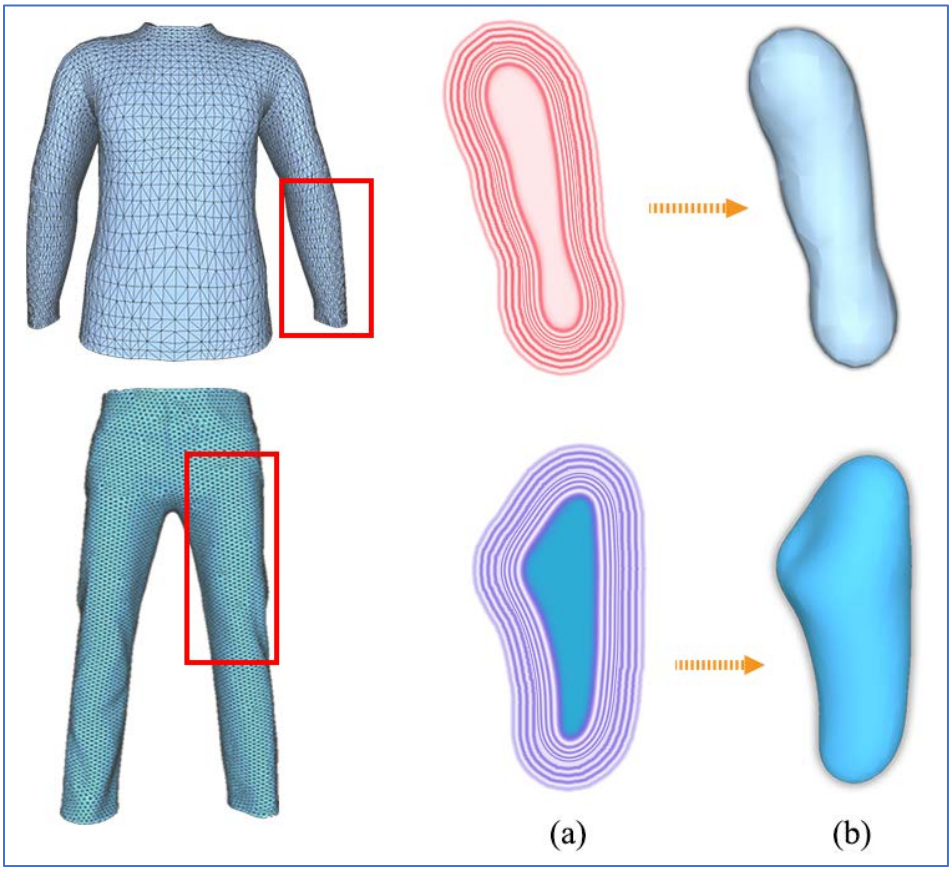


Figure 2-6 : Approximation des segments de vêtements ; (a) champs de potentiel HRBF ; (b) surfaces implicites résultantes

Pour résoudre le problème de trous, nous ajoutons deux points de contrôle c_1 et c_2 dans la limite du segment de maillage à une distance m_J de l'articulation J (figure 2.7 (b)). Cette distance est calculée entre le point d'articulation de l'os et le sommet d'extrémité du segment de maillage. L'introduction de ces nouveaux points permet de générer une reconstruction plausible des segments comme illustrés sur la figure 2.7 (b).

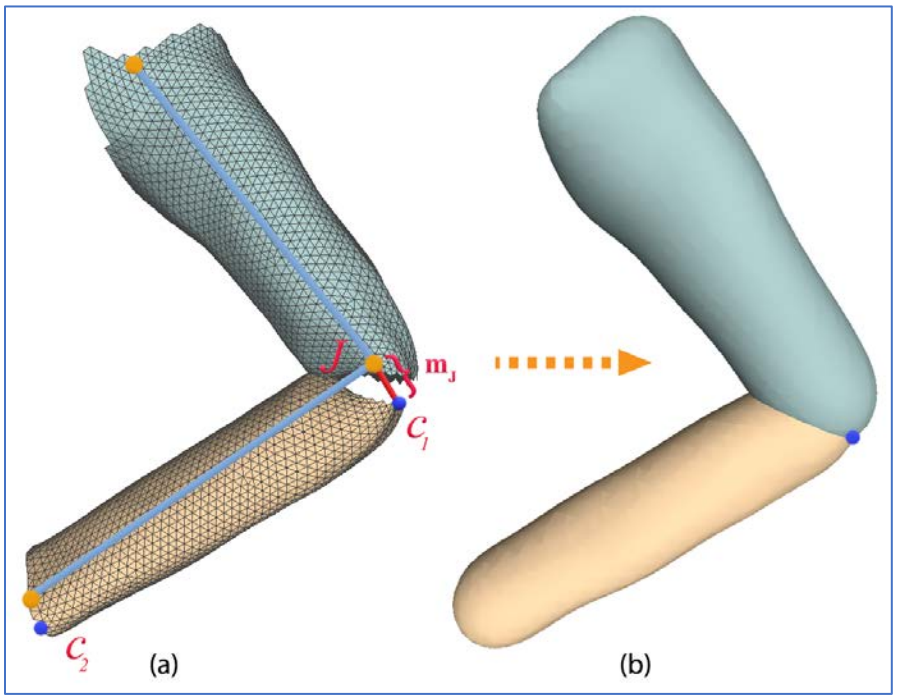


Figure 2-7 : Remplissage des trous laissés par l'étape de partitionnement ; (a) point de contrôle supplémentaire en bleu ; (b) la surface implicite finale reconstruite

2.3.2.1. Composition des champs potentiel

Après avoir calculé les fonctions de champ f_i pour chaque partie i du maillage. Nous composons tous ces champs partiels pour fournir un champ unique F qui définit l'approximation implicite de l'ensemble du vêtement. Au fil des années, l'amélioration de la composition des fonctions de champ, a été un axe de recherche important en modélisation et animation des surfaces implicites [109]. Parmi les opérateurs les plus utilisés pour la composition de deux surfaces implicites, on trouve l'opérateur d'union introduit par Ricci et al. [119]. La composition de deux champs adjacents f_1 et f_2 à l'aide de cet opérateur d'union est obtenu en utilisant la formule suivante :

$$k(f_1, f_2) = \max(f_1, f_2) \quad (2.7)$$

Cependant, la version standard de l'opérateur d'union génère des fonctions de champ avec une continuité C^0, qui peuvent provoquer des effets indésirables au niveau des articulations, et ainsi conduire à des comportements indésirables de la surface lorsque les champs sont déplacés. De plus, en utilisant cet opérateur, la composition peut se produire même si les surfaces ne sont pas en contact. Afin d'éviter ces problèmes de composition, nous avons adopté l'opérateur de mélange

basé sur le gradient proposé par Gourmel et al. [54]. Cet opérateur est basé sur le concept d'utilisation des fonctions d'ouverture θ pour contrôler la composition. Ce concept a prouvé son efficacité dans la modélisation de contact entre deux surfaces implicites qui se croisent.

L'idée de base derrière les opérateurs basés sur le gradient est d'interpoler la composition entre l'union et le mélange en fonction d'un paramètre θ, qui est une fonction de conversion de l'angle entre les gradients de deux champs composés f_1 et f_2. Ainsi, θ est défini comme $\theta(\alpha)$.

Dans l'implémentation, nous avons défini l'angle α comme étant l'angle de rotation entre les os associés à f_1 et f_2. Comme nous pouvons le voir sur la figure 2.8, la valeur de cet angle est souvent proche de celle de l'angle entre les gradients de champ au niveau de l'articulation. L'exemple illustre une partie de genou d'un modèle de pantalon. Les flèches bleues et rouges sont respectivement les gradients des champs supérieurs et inférieurs.

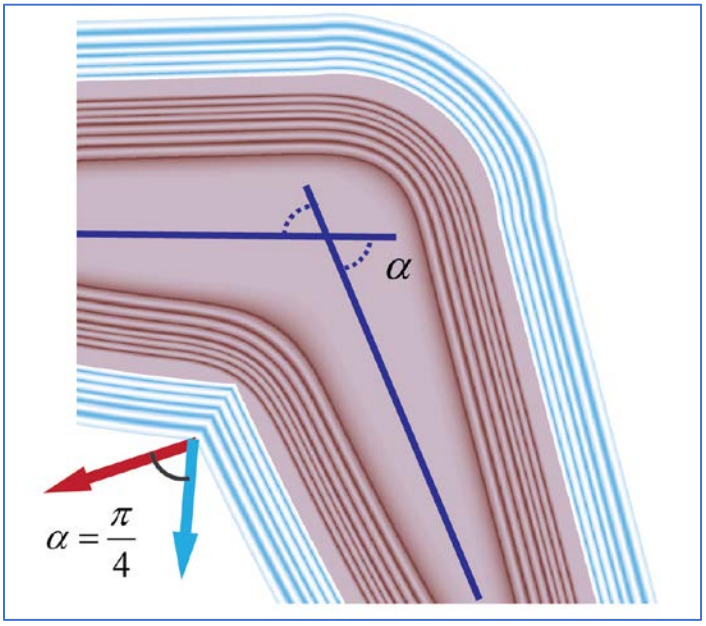


Figure 2-8 : Calcul de l'angle α à partir de l'angle entre les os associés aux champs.

L'application d'opérateur de mélange à base de gradient est effectuée suivant la configuration comme suit (figure 2.9) :

- Nous utilisons l'opérateur union lorsque f_1 et f_2 sont alignés, ce qui signifie que leurs os sont alignés $(\alpha = 0)$ et $\theta(0) = \theta_u$;

- Pour $\alpha \in \left]0, \frac{\pi}{4}\right]$, nous utilisons l'opérateur de mélange lisse avec $\theta(\alpha) = \theta_b(\alpha)$ (calculée en suivant l'équation 2.8) ;
- Pour $\alpha \in \left]\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right]$, la composition est effectuée à l'aide du mélange lisse avec $\theta(\alpha) = \theta_b(\alpha)$ (l'équation 2.8) ;
- Pour $\alpha \in \left]\frac{\pi}{2}, \pi\right]$ utilisons l'opérateur union avec $\theta(\alpha) = \theta_u$.

Dans l'implémentation, nous avons calculé le paramètre $\theta(\alpha)$ en utilisant le *"mapping"* suivant :

$$\theta(\alpha)\begin{cases} \theta_u = \frac{\pi}{4} & si \quad \alpha = 0 \\ \theta_b(\alpha) = \frac{3\pi}{20}\left(e\left(1 - \frac{4\alpha}{\pi}\right)\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\pi}{10} & si \quad \alpha \in \left]0, \frac{\pi}{4}\right] \\ \theta_b(\alpha) = \frac{3\pi}{20}\left(e\left(\frac{4\alpha}{\pi} - 1\right)\right) + \frac{\pi}{10} & si \quad \alpha \in \left]\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right] \\ \theta_u = \frac{\pi}{4} & si \quad \alpha \in \left]\frac{\pi}{2}, \pi\right] \end{cases} \qquad (2.8)$$

avec $e(x) = 1 - \exp\left(1 - \frac{1}{\exp\left(1 - \frac{1}{x}\right)}\right)$.

Nous avons implémenté l'opérateur de mélange k_b comme étant une fonction par morceaux. Nous modifions la partie intérieure de sorte que le mélange diminue entre les valeurs de champ potentiel 0.5 et 0.6. Ce paramétrage est le plus approprié pour produire un champ interne bien adapté au déplacement des sommets lors de la projection (paragraphe 2.3.3). L'équation de l'opérateur de mélange est donnée comme suit :

$$k_b(f_1, f_2) = \begin{cases} \max(f_1, f_2) & si \quad f_1 > 0.5 \ ou \ f_2 > 0.6 \\ \max(f_1, f_2) & si \quad f_1 < I_\theta(f_2) \ ou \ f_2 < I_\theta(f_1) \\ X & sinon \end{cases} \qquad (2.9)$$

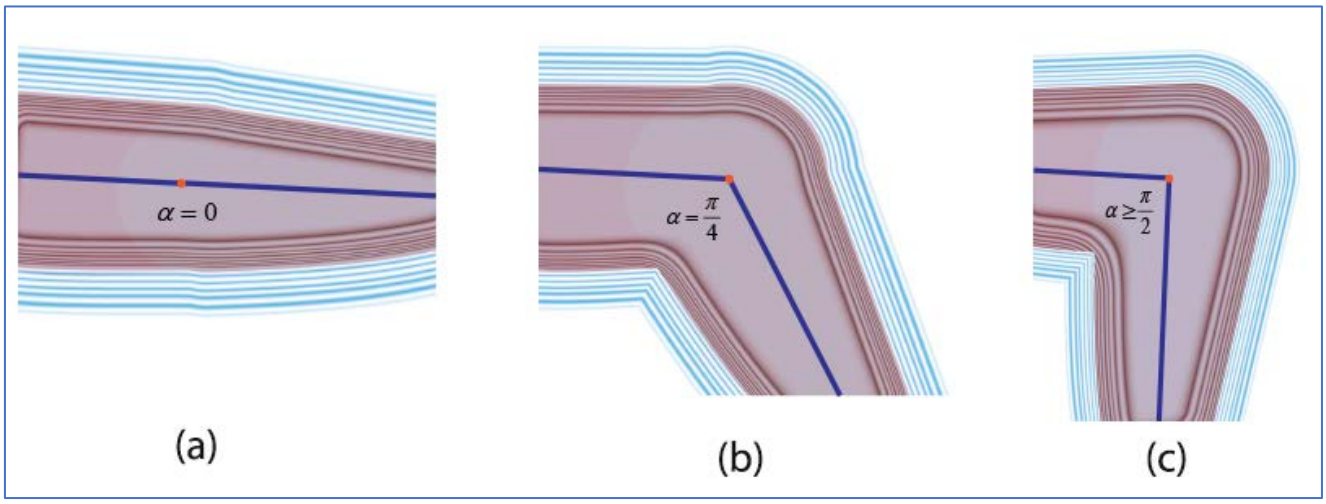


Figure 2-9 : Coupe transversale du champ généré par la composition des deux champs constituants la partie de genou ; (a) et (c) le résultat de composition avec l'opérateur d'union ; (b) le résultat de composition avec l'opérateur de mélange lisse

avec X est déterminé par la résolution de l'équation suivante :

$$\frac{\sqrt{\left(f_1 - I_\theta(X)\right)^2 + \left(f_2 - I_\theta(X)\right)^2}}{\left(X - I_\theta(X)\right)} - 1 = 0 \quad (2.10)$$

Et la fonction h_θ est exprimée comme suit :

$$I_\theta(x) = \begin{cases} \tan(\theta)\, x & si \quad f_1 \leq 0.5 \quad et \quad f_2 \leq 0.6 \\ \frac{1}{2}\left(7 - 5\tan(\theta)\right)x + \frac{7}{4}\left(\tan(\theta) - 1\right) & sinon \end{cases} \quad (2.11)$$

Le processus de composition est effectué de manière récursive en utilisant une composition par arbre, qui ressemble beaucoup à un arbre CSG classique [147]. L'arbre de composition (où les fonctions de champ sont des feuilles et les opérateurs de composition sont des nœuds) est alors construit comme suit :

Suivant la structure du squelette d'animation, les champs associés aux os d'extrémité sont d'abord composés avec les champs de leurs os parents, à l'aide de l'opérateur de composition k_b. Cette première composition forme la base de l'arbre. Ensuite, les champs résultants sont composés avec leurs parents, jusqu'à ce que toutes les primitives soient combinées dans un seul arbre. À la fin, l'opérateur de composition finale définit le champ scalaire F qui représente l'ensemble du maillage du vêtement.

2.3.3. Déformation de vêtements

Après la reconstruction de surface implicite pour le maillage du vêtement à l'aide d'approximation HRBF, celle-ci peut être facilement déformé en appliquant les transformations spatiales du squelette aux champs scalaires f_i. Ainsi durant la déformation du vêtement, les champs scalaires sont déplacés par la transformation T_i de leurs os associés, telle que :

$$\begin{cases} f_i(v) = f_i\left(T_i^{-1}v\right) \\ \nabla f_i(v) = J\left(T_i\right)\nabla f_i\left(T_i^{-1}v\right) \end{cases} \quad (2.12)$$

Où J est la matrice Jacobienne de T_i. L'algorithme 2.1 détaille le pseudo-code de l'étape de suivi du maillage. Chaque fois que nous appliquons une transformation aux champs f_i, nous effectuons à nouveau une étape de composition comme dans le paragraphe 2.3.2.1. Cela permet d'obtenir un nouveau champ global F_t qui représente la composition récursive des champs transformés (Figure 2.10 (b)). Par conséquent, le champ F_t suit le mouvement du squelette (Figure 2.10 (a)), et grâce à l'utilisation de l'opérateur à base de gradient, la composition produit de meilleurs résultats de gestion de contact de surface au niveau des articulations (Figure 2.10 (c)).

Comme illustré sur la figure 2.10, la surface du champ potentiel capture approximativement la forme à basse fréquence du maillage du vêtement. Notre idée de déformation consiste à utiliser ce champ potentiel comme contrôleur de la déformation du maillage. Ce qui va permettre une correction des distorsions produite par la déformation du vêtement à l'aide de *skinning* par quaternions duaux (DQS) (Annexe C).

Pratiquement, le processus de déformation du vêtement se déroule de la façon suivante :

- Avant de commencer la déformation du vêtement, tout sommet v du maillage stocke sa valeur initiale e_v de champ potentiel (non déformé) tel que $e_v = F_{t_0}(v)$;
- Pendant la déformation, les sommets du maillage sont déplacés en utilisant une transformation par méthode de *dual-quaternions skinning*, ce qui nous donne une première estimation du maillage déformé ;

- Dans chaque sommet v, la comparaison de la valeur du nouveau champ potentiel transformé $F_t(v)$, avec la valeur initiale e_v permet de déterminer si la position de v doit être ajustée. En suivant ce processus, les sommets gardent une même iso-valeur de champ potentiel, et par la suite on évite les distorsions produites par la déformation DQS initial. La figure 2.11 montre le processus de suivi des sommets du maillage.

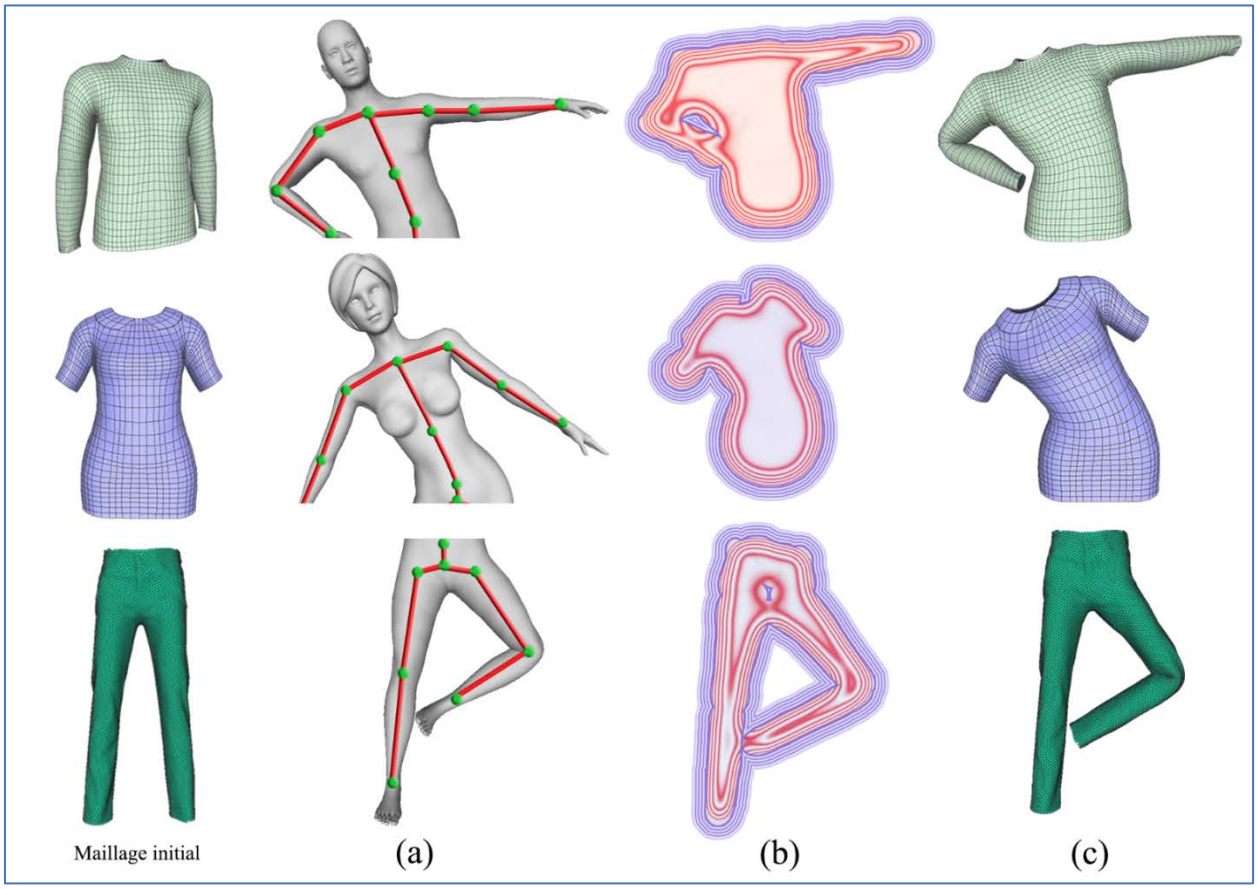


Figure 2-10 : Exemple de déformation de trois modèles de vêtement ; (a) positionnement de squelette d'animation ; (b) Le champ potentiel global obtenu après la transformation ; (c) la déformation de vêtement

Nous avons résumé les étapes du processus de suivi des sommets dans l'algorithme 2.1. Pratiquement, le processus est effectué de manière itérative jusqu'à ce que l'iso-valeur ciblée soit atteinte. À chaque itération, nous évaluons la valeur de F_t ainsi que son gradient en tout sommet v. Ensuite nous calculons le vecteur de déplacement $\vec{h}$ dont la direction est donnée par le gradient de F_t, et la longueur d donnée par la distance entre la valeur $F_t(v)$ et la valeur initiale e_v. Le paramètre $\tau = 0.35$ contrôle la vitesse à laquelle les sommets convergent vers leur

position initiale par rapport au champ scalaire. Le processus de suivi est effectué en utilisant les itérations de Newton afin de fournir une convergence rapide et précise.

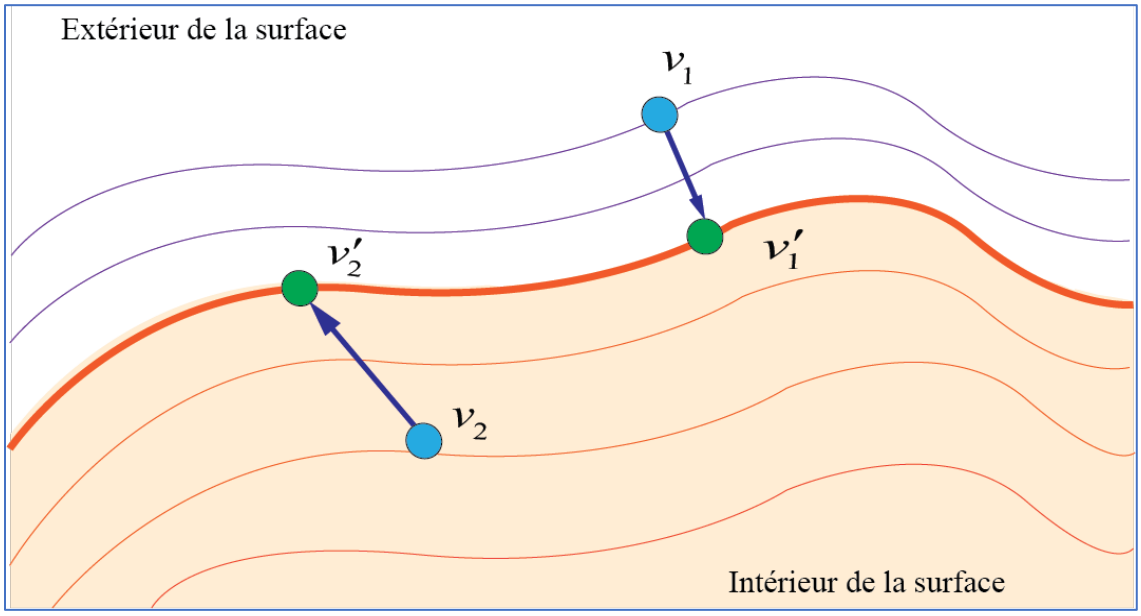


Figure 2-11 : Exemple de correction des positions de sommet effectuée à l'aide du processus de suivi

Algorithme 2.1 : Processus de suivi du sommet.

Entrée : Le maillage du vêtement M, champ potentiel F_t, critère de convergence τ

Sortie : v' : la position mise à jour de v

1. **Pour tout** $v \in M$ **faire**
2. Mettre à jour la fonction de champ $f_i \leftarrow F_t(v)$
3. Calculer la direction $\vec{h} \leftarrow \nabla F_t(v)$
4. Calculer la longueur $d \leftarrow f_i - e_v$
5. **Si** $|d| < \varepsilon$ **alors**
6. **Retourner** v
7. **Fin si**
8. Calculer le vecteur de déplacement $\vec{k} \leftarrow -\tau d \left(\frac{\vec{h}}{\|\vec{h}\|^2} \right)$
9. Mettre à jour la position du sommet $v' \leftarrow v + \vec{k}$
10. **Retourner** v'
11. **Fin pour**

Étant donné que les positions des sommets générées par DQS peuvent être éloignées de leurs positions exactes, une simple utilisation du processus de suivi pourrait engendrer des lacunes exceptionnelles dans le maillage déformé après quelques transformations. Afin d'améliorer le déplacement des sommets et d'éviter ses lacunes, nous effectuons une étape de relaxation tangentielle en utilisant la méthode des coordonnées de valeur moyenne proposée par Hormann et al. [65], qui vise à déplacer chaque sommet vers le centre de gravité pondéré de ses voisins comme indiqué sur la figure 2.12. Plus précisément, les coordonnées barycentriques Φ_j sont précalculées dans la pose initiale de chaque sommet v_i par rapport à son anneau de sommet voisin. La relaxation tangentielle déplace les sommets en utilisant la formule suivante :

$$v' = (1-\mu)v + \mu\sum_j \Phi_j c_j \qquad (2.13)$$

avec c_j représente un sommet voisin de v qui est projeté sur son plan tangentiel. Le coefficient μ est utilisé pour contrôler le degré de l'opération de relaxation, et il est défini par : $\mu = \max\left(0{,}1-\left(\left|F_t(v)-e_v\right|-1\right)^4\right)$.

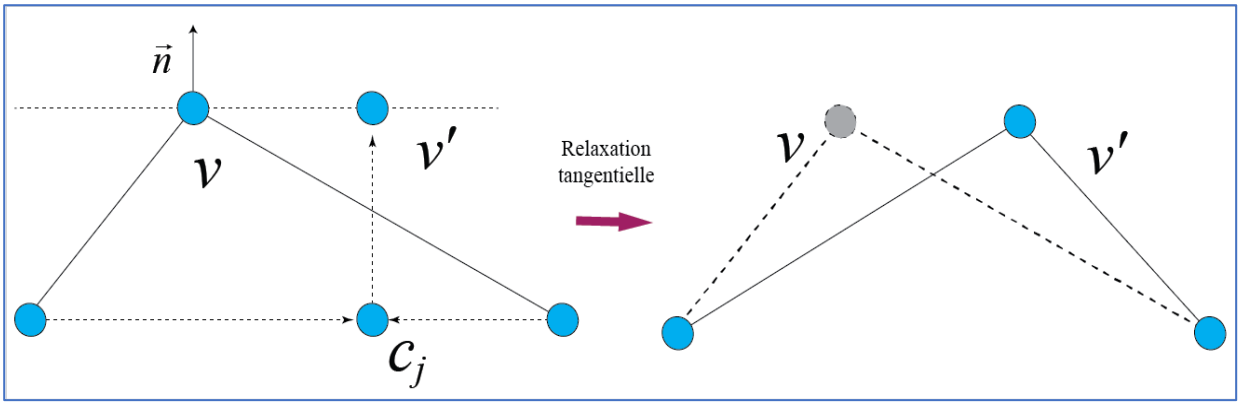


Figure 2-12 : Exemple de relaxation tangentielle

2.4. Génération de plis

Dans ce paragraphe, nous détaillons la méthode utilisée pour générer des plis plausibles sur un maillage déformé à l'aide d'enrobage implicite basé sur l'approximation HRBF. Ce processus suit l'étape précédente de reconstruction du maillage qui consiste à déformer le vêtement. L'idée clé de cette méthode de synthèse de plis est de tirer parti des champs scalaires f_i disponibles. Nous utilisons leur intersection au niveau des articulations pour tracer des courbes de plis. Cette

intersection permet de préciser les points de génération (semences) des courbes. Les directions des courbes sont déterminées par le calcul d'angles entre les gradients de deux champs consécutifs. Afin de créer la forme géométrique des plis, nous transformons ces courbes de plis en surfaces de convolution. Finalement, nous combinons les surfaces de convolution générées avec le maillage de tissu.

2.4.1. Préparation des champs d'angles

En général, les plis de vêtements apparaissent dans les régions d'articulation en suivant la direction de la contraction. Afin de déterminer la direction des courbes de plis, nous commençons par le calcul des angles entre les gradients des deux champs adjacents f_1 et f_2 dans les points d'intersection (figure 2.13). L'angle entre les gradients est alors calculé pour tout sommet $v \in f_1 \cap f_2$ comme suit :

$$A\left(f_1(v), f_2(v)\right) = \arccos \frac{\nabla F_1(v).\nabla F_2(v)}{\left\|\nabla F_1(v)\right\|.\left\|\nabla F_2(v)\right\|} \quad (2.14)$$

Suivant les valeurs de A, nous générons un champ d'intersection f_A. Ensuite le gradient de f_A est approché à l'aide de la méthode des différences finies, en recherchant la position avec une valeur minimale v_m dans l'anneau du voisinage de v tel que :

$$\nabla f_A = v_m - v \quad (2.15)$$

Nous notons que le calcul de l'angle est indépendant pour chaque sommet. Comme avantage, cette étape peut être parallélisée dans une carte graphique programmable. À chaque itération, nous insérons tout sommet v traité dans une file d'attente prioritaire Q ordonnée suivant la valeur de A dans ce sommet. Nous avons détaillé le pseudo-code de cette étape dans l'algorithme 2.2 (étape 1).

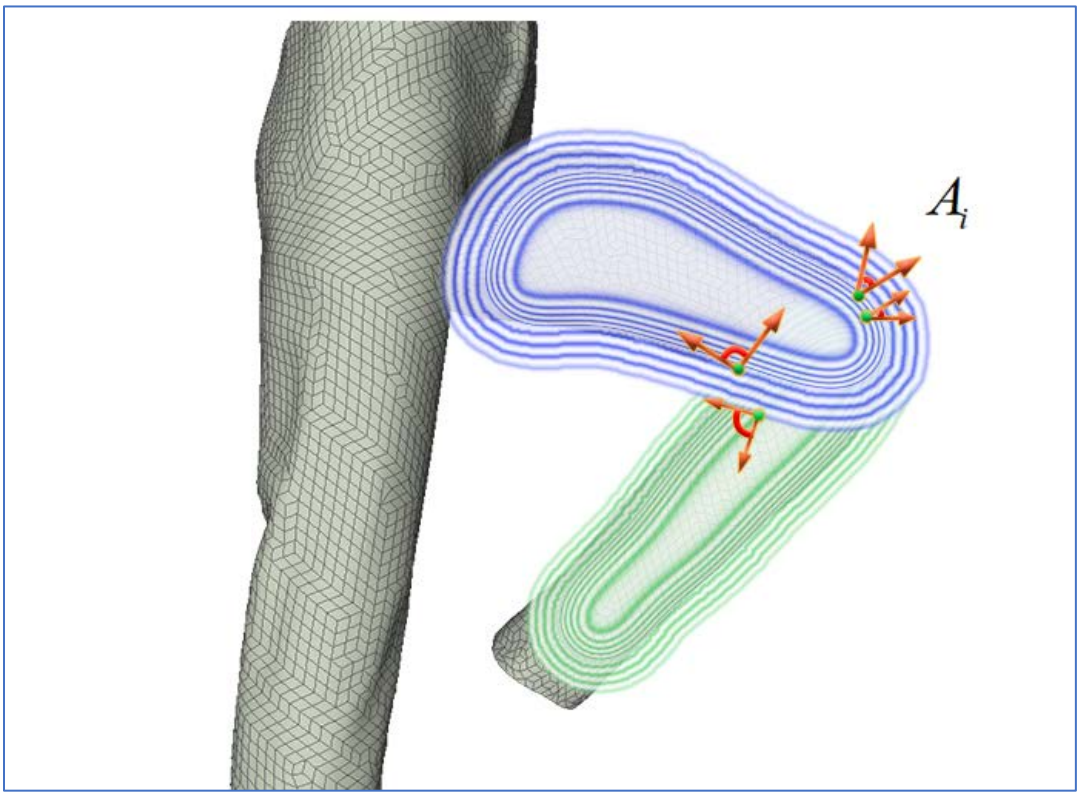


Figure 2-13 : Exemple des angles de gradient dans l'intersection de deux champs HRBF

2.4.2. Génération des courbes de plis

Nous visons à générer efficacement des courbes de plis qui donnent un aspect plausible au tissu, et qui reflètent la déformation du maillage. Pour cela, nous utilisons la file d'attente prioritaire Q que nous avons créée à l'étape précédente. Cette file contient des sommets situés dans la région d'intersection des champs potentiels comme illustrés sur la figure 2.14 (a). En commençant par le sommet du haut de la file Q, comme point de départ de la génération d'une courbe (point vert sur la figure 2.14 (b)), le processus de traçage de la courbe se déroule comme suit :

Soit p le point de départ, les sommets sont ajoutés à la courbe de manière itérative en choisissant le candidat suivant parmi les N sommets dans l'anneau d'ordre 1 du voisinage de p. Nous choisissons le sommet candidat qui a le vecteur d'arête le plus proche du gradient ∇f_A en p : soient q le sommet voisin candidat et $y = q - p$ le vecteur d'arête, le prochain sommet à ajouter à la courbe est déterminé par la minimisation suivante :

$$p_{next} = \min_{q \in N} \left(\arccos \left(y . \nabla f_A \right) \right) \quad (2.16)$$

Le processus est répété pour le point nouvellement ajouté. De plus, pour chaque point de départ, nous inversons le gradient pour propager la seconde moitié de la courbe. Pour chaque nouveau point ajouté à une courbe, nous vérifions sa distance Euclidienne par rapport à tous les points, afin de forcer la courbe à respecter une distance minimum avec les autres courbes. Cela permet de contrôler la collision entre les plis.

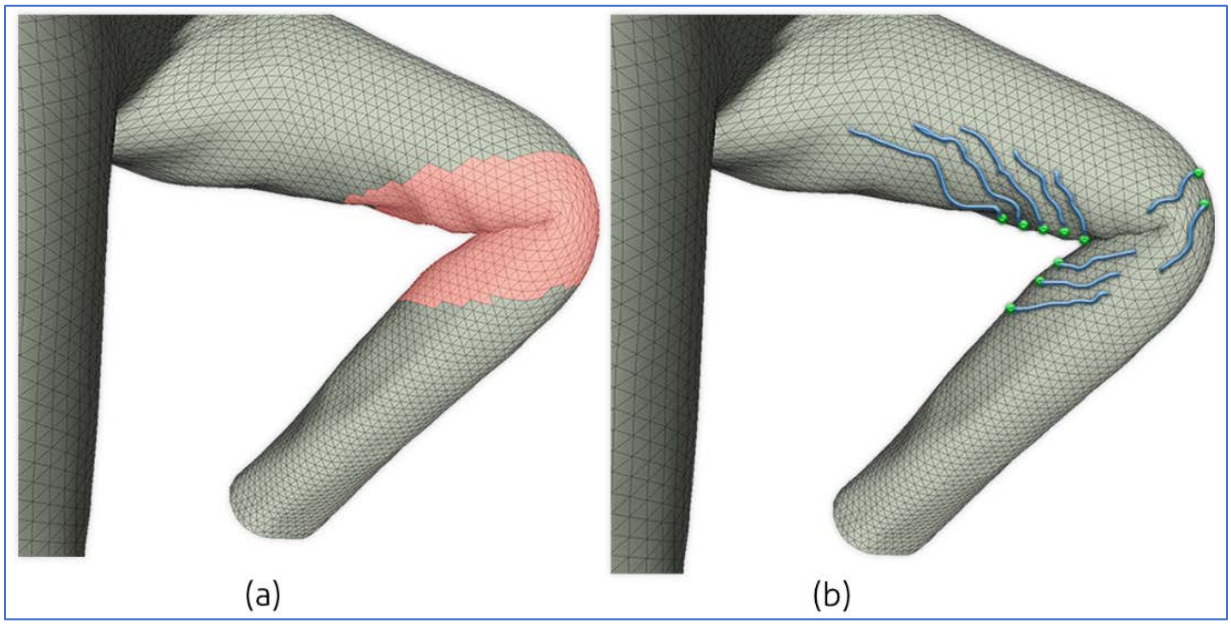


Figure 2-14 : (a) en rouge l'intersection des deux champs ; (b) en bleu les courbes de plis ; en vert les points de départ de traçage des courbes

Dans l'algorithme 2.2 (étape 2) nous détaillons le pseudo-code du processus de génération de courbes de plis. Comme données d'entrée, le système reçoit le maillage de vêtement, le nombre d'os, les champs potentiels HRBF approximés comme décrit dans le paragraphe 2.3.2. En résultat, le système produit les courbes de plis sous forme de structure de données où chaque nœud représente une courbe pour chaque point de départ (figure 2.14 (b)).

Nous pouvons noter que le système proposé est procédural et permet à l'utilisateur de contrôler la génération des courbes de plis en manipulant des paramètres de base (Algorithme 2.2), dont certains sont décrits ci-dessous :

- **Seuil de semences** (point de départ de traçage) : $\gamma \in [0,180]$ est la valeur d'angle minimum qu'un sommet de la file d'attente prioritaire doit avoir pour être sélectionné

comme point de départ de la courbe. Ce paramètre permet aux plis de commencer à se former également sur les bords de la surface.

- **Seuil de point candidat :** $\tau \in [0,1]$ est une valeur minimale du champ de gradient qu'un nouveau sommet candidat doit avoir pour être ajouté à la courbe. Ce paramètre permet de contrôler la direction de propagation de la courbe.

Algorithme 2.2 : Génération des courbes de plis.

Entrée : Maillage de vêtement, nombre d'os B, champs potentiels HRBF associés à chaque os

Sortie : Les courbe de plis.

1. Pour $i \in [1, B]$ **faire**

2. // Étape 1 : préparation des angles de champ d'intersection.

3. Créer la file d'attente prioritaire $Q_i \leftarrow [\ ]$

4. Pour tout $v \in f_i \cap f_{i+1}$ **faire**

5. Calculer l'angle $A_v = A\left(f_i(v), f_{i+1}(v)\right)$

6. Déterminer v_m dans le voisinage de v

7. Calculer $\nabla f_A = v_m - v$

8. Ajouter le triple $\langle v, A_v, \nabla f_A \rangle$ au file Q_i

9. Fin pour

10. Trier Q_i en se basant sur les valeurs de A_v

11. Créer *WrinkleCurve* $\leftarrow [\ ]$

12. // **Étape 2 : génération des courbes de plis.**

13. Pour tout p dans Q_i **faire**

14. Créer *newCurve* $\leftarrow [\ ]$

15. Si $A_p \leq \gamma$ **alors** *// paramètre défini par l'utilisateur*

16. Ajouter p à *newCurve*

17. Pour tout p_{seed} dans *newCurve* **faire**

18. Déterminer les sommets q dans le voisinage N de p_{seed}

19. Résoudre $p_{next} \leftarrow \min_{q \in N}\left((q - p_{seed}).\nabla f_A(p_{seed})\right)$

20. **Si** $\nabla f_A(p_{next}) \leq \tau$ **alors** ***// paramètre défini par l'utilisateur***

21. Ajouter p_{next} à *newCurve*

22. **Fin si**

23. **Fin pour**

24. **Fin si**

25. Ajouter *newCurve* à *WrinkleCurve*

26. **Fin pour**

27. **Retourner** *WrinkleCurve*

28. Fin pour

2.4.3. Principe du mouvement des plis

Pour donner aux courbes de plis un aspect du mouvement potentiel, nous initialisons la position des courbes à l'instant courante à partir de la position précédente. On rappelle que la génération statique place les courbes de plis en suivant les valeurs de l'angle entre les gradients des champs HRBF, et trace ces lignes le long des courbes intégrales du champ d'intersection.

Afin de prendre en considération le cas de courbes dynamiques, nous avons ajouté une étape qui permet d'attirer les courbes de plis vers les nouveaux de forte déformation. Dans l'objectif d'assurer l'efficacité de création des plis, nous ne cherchons pas les emplacements locaux de forte déformation le long de la totalité des courbes, mais uniquement pour les positions des générateurs. Dans la suite de ce paragraphe, nous décrivons la méthode utilisée pour attirer les points générateurs des courbes de plis vers les emplacements de forte déformation.

Dans l'étape de génération des courbes de plis, nous ordonnons la file d'attente prioritaire Q suivant les valeurs de A_v, ce qui permet d'ordonner les positions des points générateurs en fonction de leur taux de déformation des champs associés.

Pour chaque point générateur $p(t_i)$ à l'instant t_i, sa nouvelle position à l'instant $t_i + dt$ est définie par $p(t_i) + dp(t_i)$ avec dp est un faible déplacement de champ potentiel modélisant le glissement de plis. La figure 2.15 illustre un exemple de déplacement du point générateur.

Afin de préciser le taux de déplacement optimal des points générateurs, nous adoptons une recherche linéaire le long de la direction du gradient de champs d'intersection, tout en respectant le pas maximal autorisé entre les courbes à $R_{\max}$. Ce processus empêche donc les courbes de se déplacer de plus de la moitié de leur largeur lors d'un pas de temps, et permet un résultat visuel crédible.

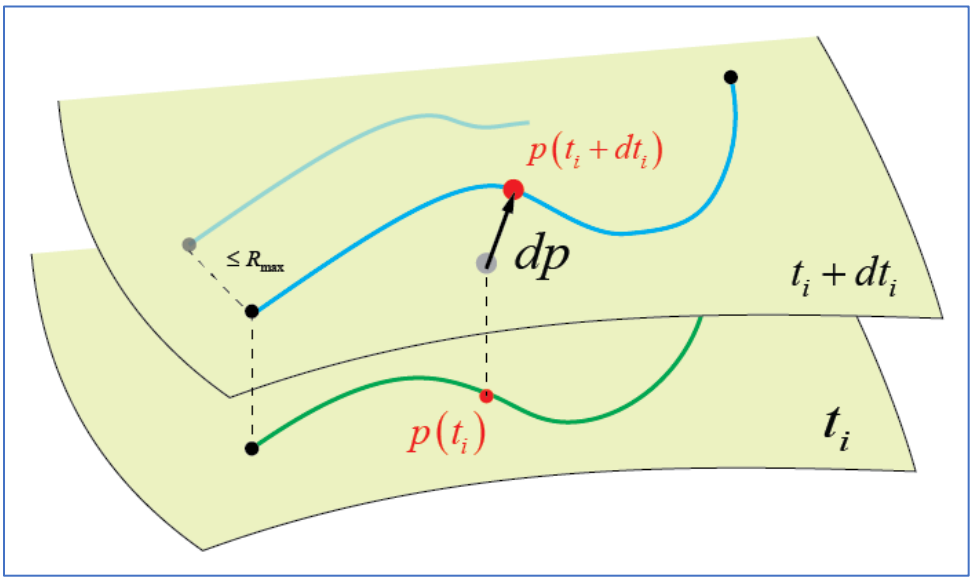


Figure 2-15 : Principe du mouvement de courbe de plis ; La courbes vert et bleu sont respectivement les courbe de plis à l'instant précédente et courante ; Le point rouge représente un exemple de mouvement de point générateur

2.4.4. Génération de la forme géométrique de plis

Une fois que les courbes de plis sont créées comme décrit dans la partie précédente, elles sont représentées comme un ensemble de segments constitué de sommets de la région d'intersection des champs. Nous créons la forme géométrique des plis en transformant ces segments en surface de convolution w_i , ainsi de seuiller la somme de leurs contributions au champ comme suit :

$$F_{wrinkle}(v) = \sum_i w_i(v) - iso \qquad (2.17)$$

Nous utilisons des surfaces de convolution avec des segments de ligne comme squelettes, et le noyau de Cauchy comme fonction potentielle. Nous suivons la formulation de surface proposée par McCormack et al. [104]. Ainsi pour un segment avec le vecteur de position a_i, la direction normalisée r_i et la longueur l, le calcul de $w_i(v)$ est réalisé en utilisant l'expression suivante :

$$w_i(v) = \frac{n}{2p_v^2\left(p_v^2 + s^2 n_v^2\right)} + \frac{l - n_v}{2p_v^2 q_v^2} + \frac{1}{2sp_v^3}\left(\operatorname{atan}\left[\frac{sn_v}{p_v}\right] + \operatorname{atan}\left[\frac{s(l - n_v)}{p_v}\right]\right) \qquad (2.18)$$

Avec $n_v = (v - a_i)r_i$, $p_v^2 = 1 + s^2\left(|v - a_i|^2 - n_v^2\right)$ et $q_v^2 = 1 + s^2\left(|v - a_i|^2 + l^2 - 2ln_v\right)$.

Dans l'implémentation, nous avons utilisé les paramètres par défaut suivants :

- L'iso-valeur dans l'équation 2.17 est défini par : $iso = 0.5$.
- La hauteur des plis est définie par : $s = 0.86$ (équation 2.18).

Le principal avantage d'utiliser les surfaces de convolution est que les segments de plis générés se fondent en douceur, et peuvent être facilement intégrés à la surface du vêtement déformé. Nous avons défini le rayon de chaque segment comme un paramètre de l'amplitude de l'angle à chaque point de la courbe. Par conséquent, les plis résultants apparaissent plus épais au milieu de la courbe et légèrement plus étroits sur les bords.

2.4.5. Projection des plis sur le maillage du vêtement

Dans cette étape, nous visons à mélanger les plis avec la surface du maillage du vêtement déformé. En effet, après avoir précisé les positions des courbes de plis, et généré le champ de plis $F_{wrinkle}$ comme surface de convolution, nous mélangeons chaque champ HRBF avec son champ de plis. Ainsi, le nouveau champ F_{comb} à un point arbitraire v, est exprimé comme suit :

$$F_{comb}(v) = \max\left(F_t(v) - 0.5, F_{wrinkle}(v)\right) \qquad (2.19)$$

Pour cette composition, nous utilisons l'opérateur union, bien qu'un opérateur de fusion plus complexe puisse également être utilisé. Nous projetons des sommets sur ce champ combiné en utilisant des itérations de Newton [116].

Pendant la projection, nous n'avons pas besoin de gérer la collision en utilisant le gradient. Au lieu de ceci, les interpénétrations du maillage sont évitées par la réutilisation du coefficient défini dans l'étape de génération des courbes, pour interdire le déplacement des sommets dans la région de plissement.

Afin d'obtenir un aspect lisse des plis, nous avons modélisé la profondeur des plis en utilisant le décalage entre les angles d'articulation dans la pose courante et la pose d'initial. Pour obtenir l'apparence progressive des plis, nous plaçons d'abord les sommets de la courbe sous la surface du tissu à une distance, qui correspond au rayon du segment de courbe, ensuite nous les déplaçons doucement vers le haut dans la direction de la normale. La figure 2.16 montre un exemple de plis généré à l'aide de la méthode de synthèse de plis.

Nous pouvons noter qu'il est possible d'effectuer un simple déplacement des sommets de la courbe au lieu d'utiliser l'étape de projection des sommets. Cependant, cela produit des plis nets et uniformes, ainsi que le rayon des plis ne sera pas contrôlable.

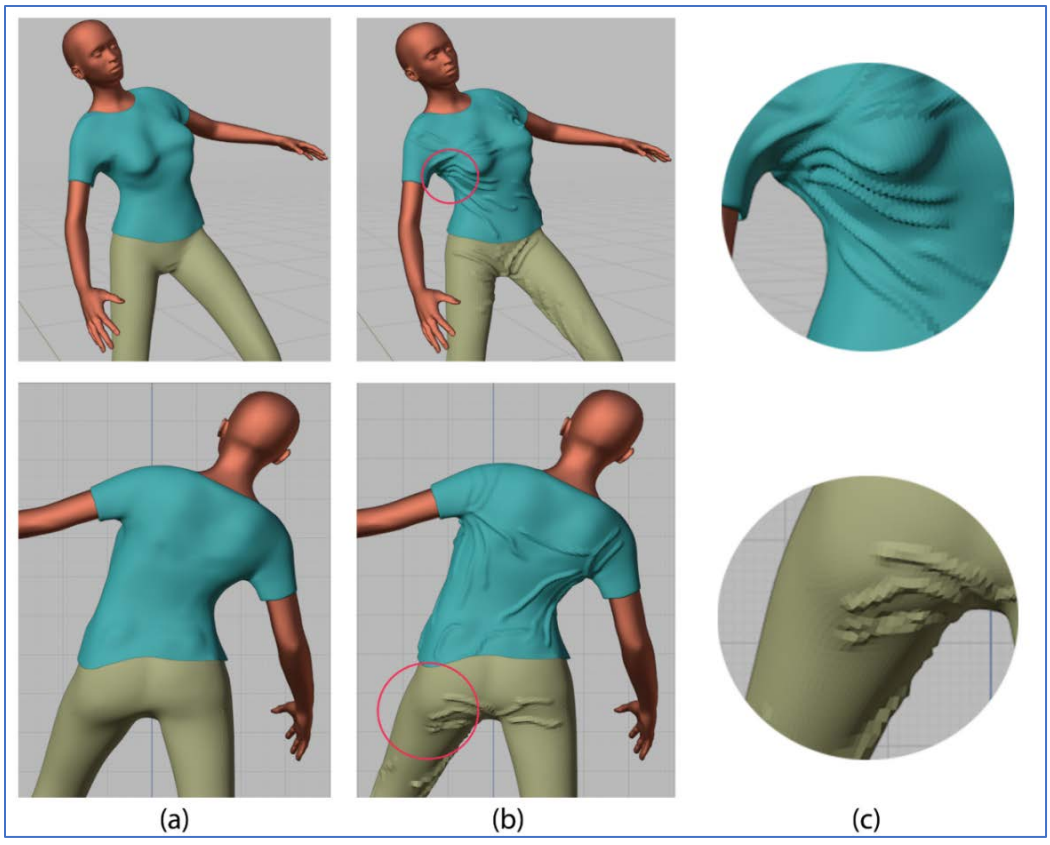


Figure 2-16 : Plis générés ; (a) maillage du vêtement déformé ; (b) maillage après l'étape de projection ; (c) zoom sur les plis ajoutés

Comme nous pouvons remarquer sur la figure 2.16 (c), l'étape de projection de plis peut engendrer des plis qui ne sont pas suffisamment lisses avec des caractéristiques pointues. Pour améliorer la qualité des plis nous effectuons une étape de lissage par Laplacien sur les sommets du maillage en utilisant la formule suivante :

$$v' = (1-\lambda)v + \lambda c_{cent} \quad (2.20)$$

Pratiquement, chaque sommet v_i est déplacé vers le centroïde de son anneau des sommets voisins. Le coefficient de lissage λ est mis à 1 pour les sommets arrêtés à une discontinuité de gradient, et à 0 pour les autres sommets. Pour avoir une transition propre, les valeurs λ sont interpolées par diffusion avant d'appliquer le lissage. Le résultat final d'application du lissage est illustré sur la figure 2.17.

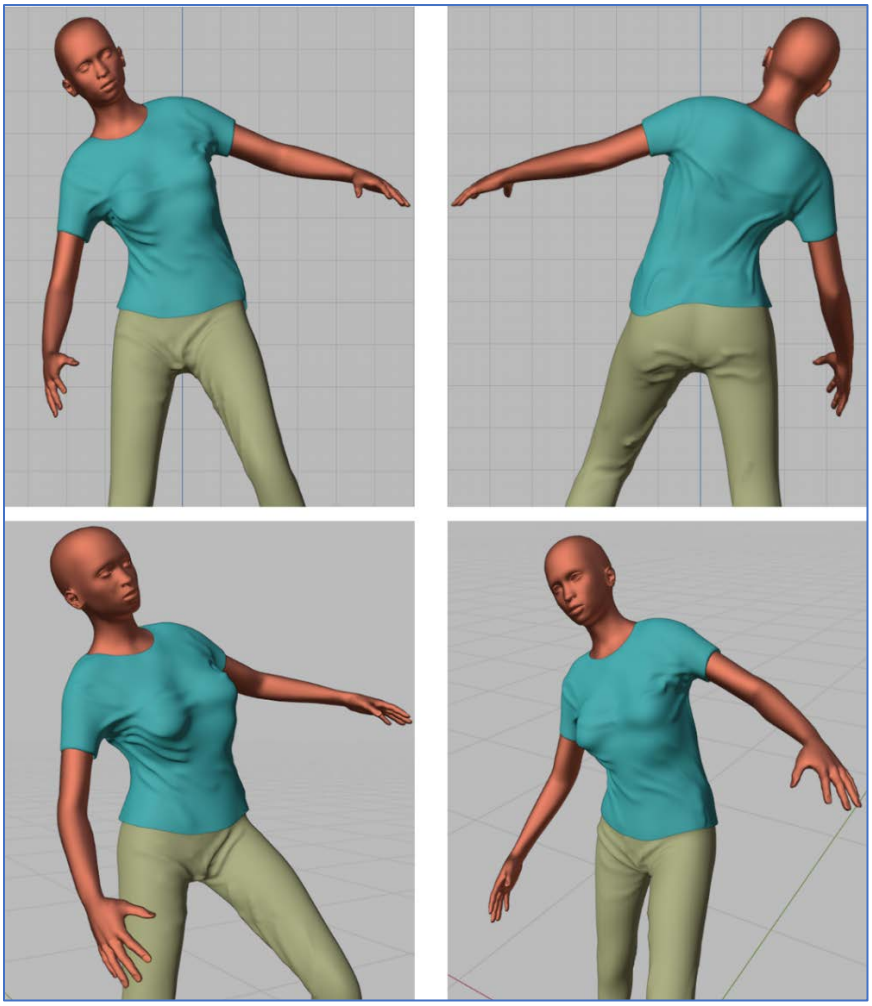


Figure 2-17 : Maillage final obtenu à la fin d'application du lissage

2.5. Résultats expérimentaux

Dans le présent paragraphe, nous évaluons les résultats obtenus par comparaison à d'autres méthodes proposées dans ce contexte, et nous montrons l'efficacité de notre approche d'ajout de plis en matière de plausibilité visuelle et performances d'exécution.

2.5.1. Performances de calcul

Nous avons implémenté la méthode d'ajout de plis sur un PC avec processeur Intel i7-4720HQ de capacité 2.60 GHz, un GPU GeForce 480 GTX, et une RAM de 16GB.

Dans l'implémentation, nous avons utilisé le mécanisme du parallélisme sur le GPU de manière intensive. Plus précisément, la génération des surfaces *"Dual quaternions"* [75], le suivi des sommets et la relaxation tangentielle sont des étapes effectuées par sommet en utilisant la technique du parallélisme sur GPU. Pour permettre une évaluation d'interpolation rapide, nous avons échantillonné les fonctions potentielles à une résolution de 229 en texture 3D et l'opérateur de composition (Paragraphe 2.3.2.1) à une résolution de 1189.

Comme squelette d'animation pour animer les personnages habillés de nos exemples, nous avons adopté les squelettes prédéfinis, qui sont proposés dans la base de données de *Motion Capture Database (MCD)* de l'Université Carnegie Mellon [126]. Tous les modèles de vêtements que nous avons utilisés sont animés avec un squelette de 6 à 21 os. Ils nécessitent de 1 Mo à 5 Mo pour le stockage du maillage déformé.

Nous pouvons noter que l'étape du calcul de l'angle entre les champs HRBF, ainsi que l'étape de projection de sommets des courbes (Paragraphe 2.3.3) sont des tâches indépendantes, c'est-à-dire qu'elles pourraient facilement être implémentées sur le GPU ou sur des processeurs "*Multithread*".

Nous avons résumé les performances d'exécution des principales étapes de la méthode de synthèse de plis dans le tableau 2.1.

Maillage	#Nbr de sommet	Point de semence de courbe (γ)	Point candidat (τ)	Approximation HRBF (s)	Calcul de l'angle A_v (ms)	Traçage des courbes (s)	#Nbr de sommet de plis	Génération de forme de plis (ms)	Totale (s)
Pantalon (Figure 2.17 ci-dessus)	4910	45	0.76	0.28	1.52	0.81	940	1.78	0.82
Chemise (Figure 2.17)	10000	75	0.33	0.45	1.68	0.92	3910	4.76	1.32
Chemise (Figure 2.18 (pose 1))	17507	30	0.76	0.57	1.70	0.76	3185	3.87	1.34
Combinaison (Figure 2.16)	19163	45	0.76	0.74	1.82	0.95	4800	5.13	1.70
Pantalon (Figure 2.20(a))	9989	120	0.8	0.33	1.57	1.07	3460	4.27	1.41
Pantalon (Figure 2.20(b))	9989	120	0.4	0.33	1.57	1.21	4210	4.95	1.55
Pantalon (Figure 2.21(a))	10108	75	0.38	0.41	1.60	0.87	1600	2.51	1.29
Pantalon (Figure 2.21(b))	10108	117	0.38	0.41	1.60	1.13	5300	5.68	1.55

Tableau 2-1 : Temps d'exécution des principales étapes de la méthode de synthèse de plis

Nous avons appliqué la méthode proposée sur divers modèles de vêtements. Les statistiques exposées dans le tableau 1 montrent le nombre de sommets de chaque maillage de vêtement, les paramètres d'entrée concernant la forme, la densité des plis, le temps d'exécution d'approximation HRBF et des étapes de création des plis.

D'après les résultats exposés dans le tableau 2.1, nous notons que la méthode d'ajout de plis proposée requiert des temps de calcul plus adaptés pour les outils de modélisation de vêtements. Cependant, son application directe aux animations de jeux vidéo reste encore trop coûteuse en temps de calcul. Comme nous pouvons remarquer, l'approximation HRBF et le traçage des

courbes sont clairement les étapes les plus couteuses en matière de temps d'exécution. Tandis que ces étapes peuvent être implémentées en parallèle sur un GPU programmable, et ainsi profiter d'une implémentation optimisée sur la carte graphique pour améliorer les performances. Nous pouvons en plus noter que le nombre de sommets projetés dépend principalement des valeurs de γ et τ.

2.5.2. Évaluation qualitative de la méthode d'ajout de plis

Dans ce paragraphe, nous exposons une gamme de vêtements qui sont traitées à l'aide de la méthode de synthèse des plis. Nous avons testé la méthode sur différents types de modèles de vêtements provenant principalement de deux sources : logiciels de modélisation 3D [20, 102] et la base de données de vêtements 3D *GarNet* proposé par [56].

2.5.2.1. Application sur des modèles serrés et amples

Nous avons testé l'ajout de plis sur deux exemples de vêtements serrés portés par un personnage. La figure 2.18 montre la simulation produite pour un modèle de T-shirt et un modèle de pantalon. Nous pouvons remarquer que les plis générés reflètent les caractéristiques intrinsèques du tissu déformé. De plus, les plis ajoutés pour chaque pose sont différents, ce qui donne une apparence plus réaliste de la déformation du modèle. En effet, en réalité les plis du tissu se forment et se modifient continuellement lors de l'animation.

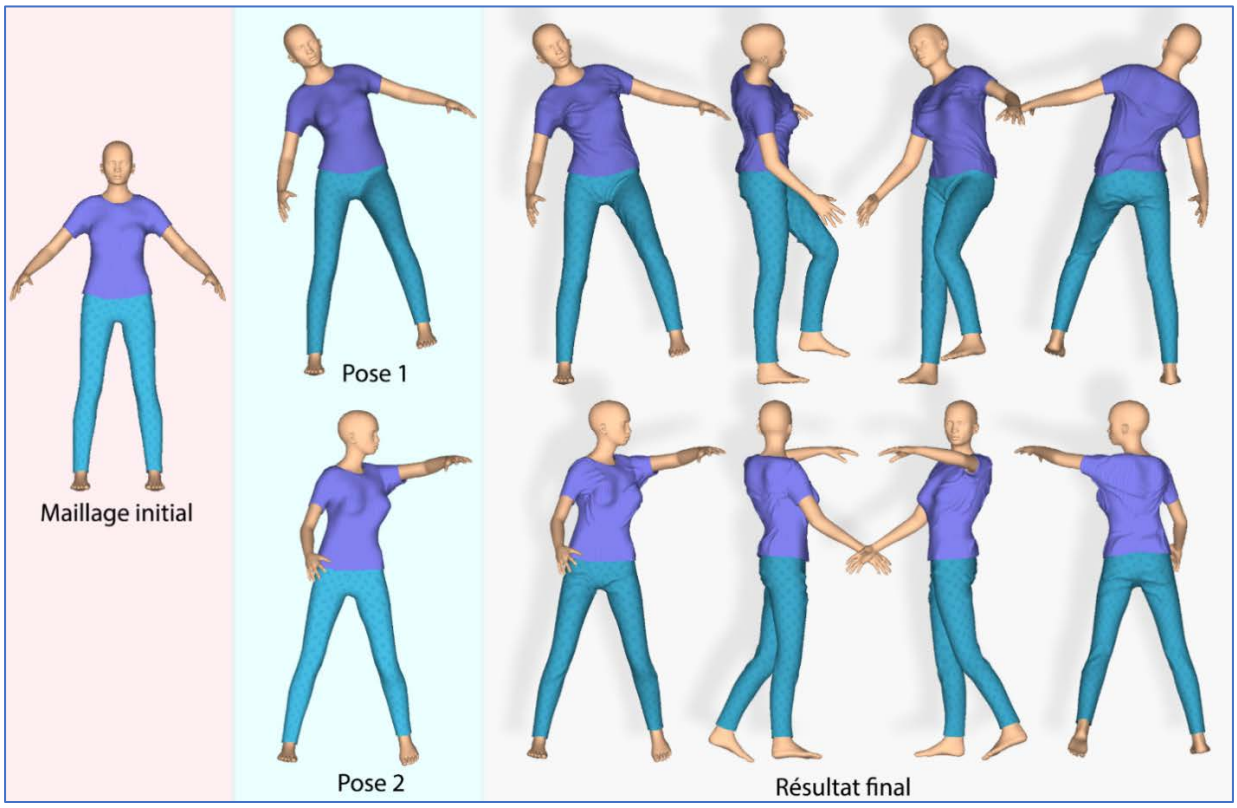


Figure 2-18 : Résultats de plissement de deux modèles serrés portés par un personnage pendant deux poses d'animation

Afin de montrer l'efficacité de la méthode d'ajout de plis pour le cas des vêtements amples comme une robe, nous l'avons testée sur deux modèles de robes portées par un personnage féminin. Comme on le voit sur la figure 2.19, les résultats montrent une dispersion plausible des plis sur la surface des maillages. Dans cet exemple, le maillage de robe est volontairement choisie flottante au niveau du bas de l'abdomen pour amplifier l'impression de mouvement d'inclinaison dynamique. Cette illustration montre différentes perspectives du personnage, ainsi cela prouve la polyvalence des plis réalisés sur la surface du tissu. Nous pouvons noter que les plis suivent le sens de déformation du maillage. Cela améliore clairement l'apparence et le dynamisme de la scène.

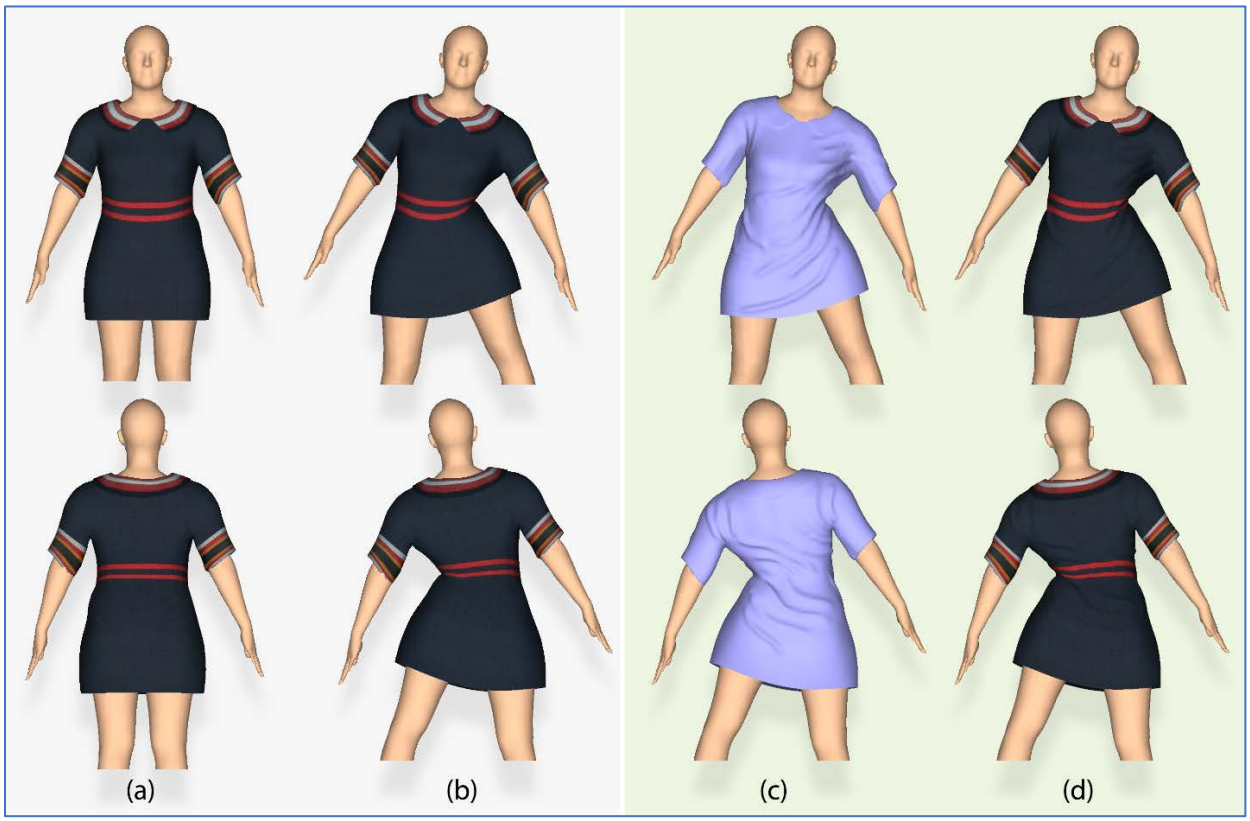


Figure 2-19 : Résultat d'ajout de plis sur un modèle de robe ; (a) modèle initial ; (b) modèle déformé ; (c) maillage avec des plis et (d) Modèle final

2.5.2.2. Evaluation des paramètres de contrôle des plis

Sur la figure 2.20 et la figure 2.21, nous montrons que la méthode d'ajout de plis proposée permet de contrôler l'aspect réaliste du tissu, ceci par le choix des paramètres de génération de plis (τ et γ). La figure 2.20 montre deux résultats d'ajout de plis sur un modèle de pantalon en utilisant deux différentes valeurs de seuil de point générateur candidat (Paragraphe 2.4.2). Spécifiquement, pour les simulations (a) et (b), le modèle du pantalon est simulé en utilisant respectivement $\tau = 0.8$ et $\tau = 0.4$, ainsi que nous maintenons la même valeur de $\gamma = 120$. Comme nous pouvons remarquer, le vêtement de la simulation (a) à une faible densité de plis que celui de la simulation (b).

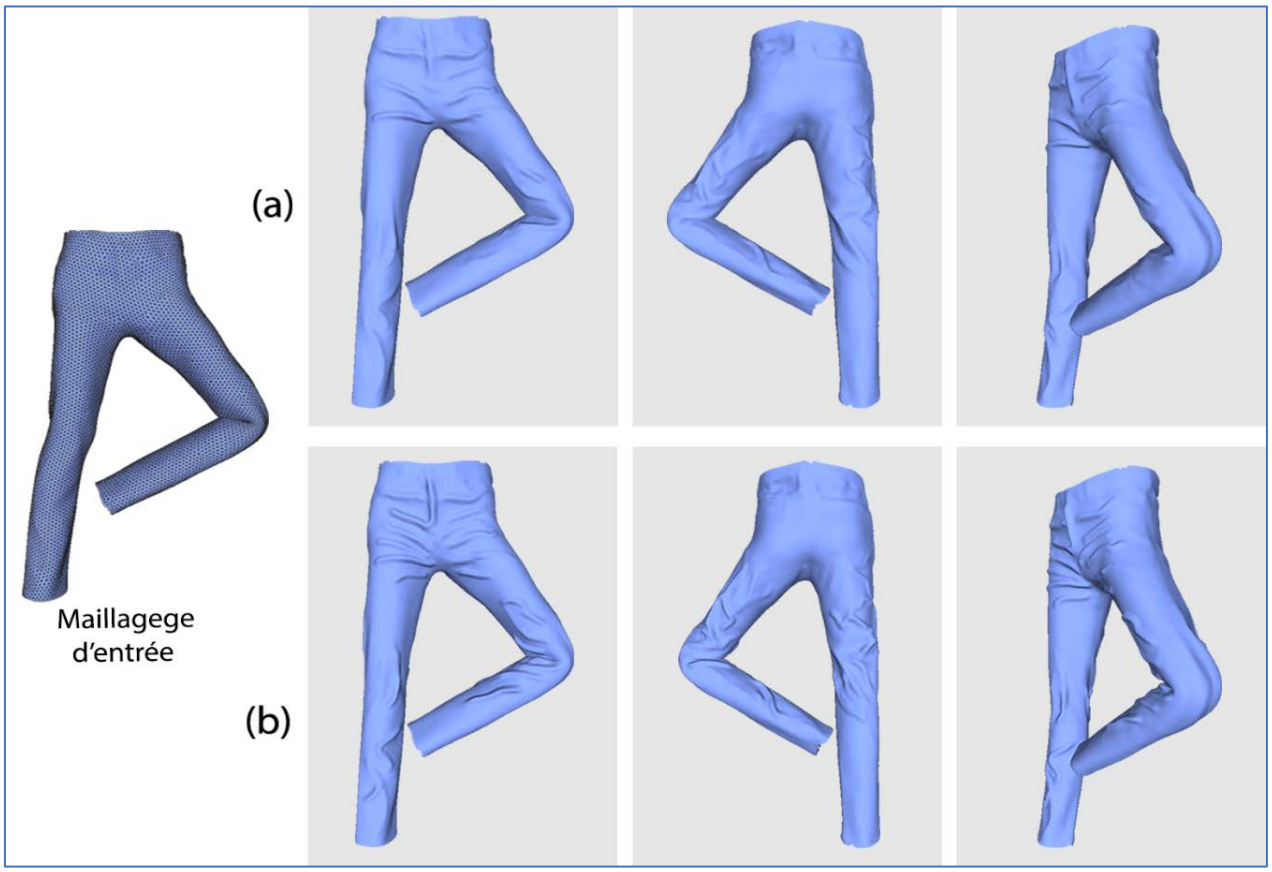


Figure 2-20 : Résultats d'ajout de plis pour un modèle de pantalon avec (a) $\tau = 0.8$ **et (b)** $\tau = 0.4$

La figure 2.21 montre l'impact de choix du paramètre de seuil de départ γ (Paragraphe 2.4.2) sur la région les plis générés. Nous montrons cet impact sur deux simulations d'un modèle de pantalon en utilisant deux valeurs différentes de seuil de départ, tout en maintenant la valeur de τ à 0.38. Pratiquement, les résultats des simulations (a) et (b) sont obtenus comme suit : le modèle du pantalon est simulé en considérant pour les deux simulations (a) et (b), $\gamma = 75$ et $\gamma = 117$ respectivement. D'après les résultats, nous pouvons remarquer que le nombre de région de plis est augmenté en passant de la simulation (a) à (b).

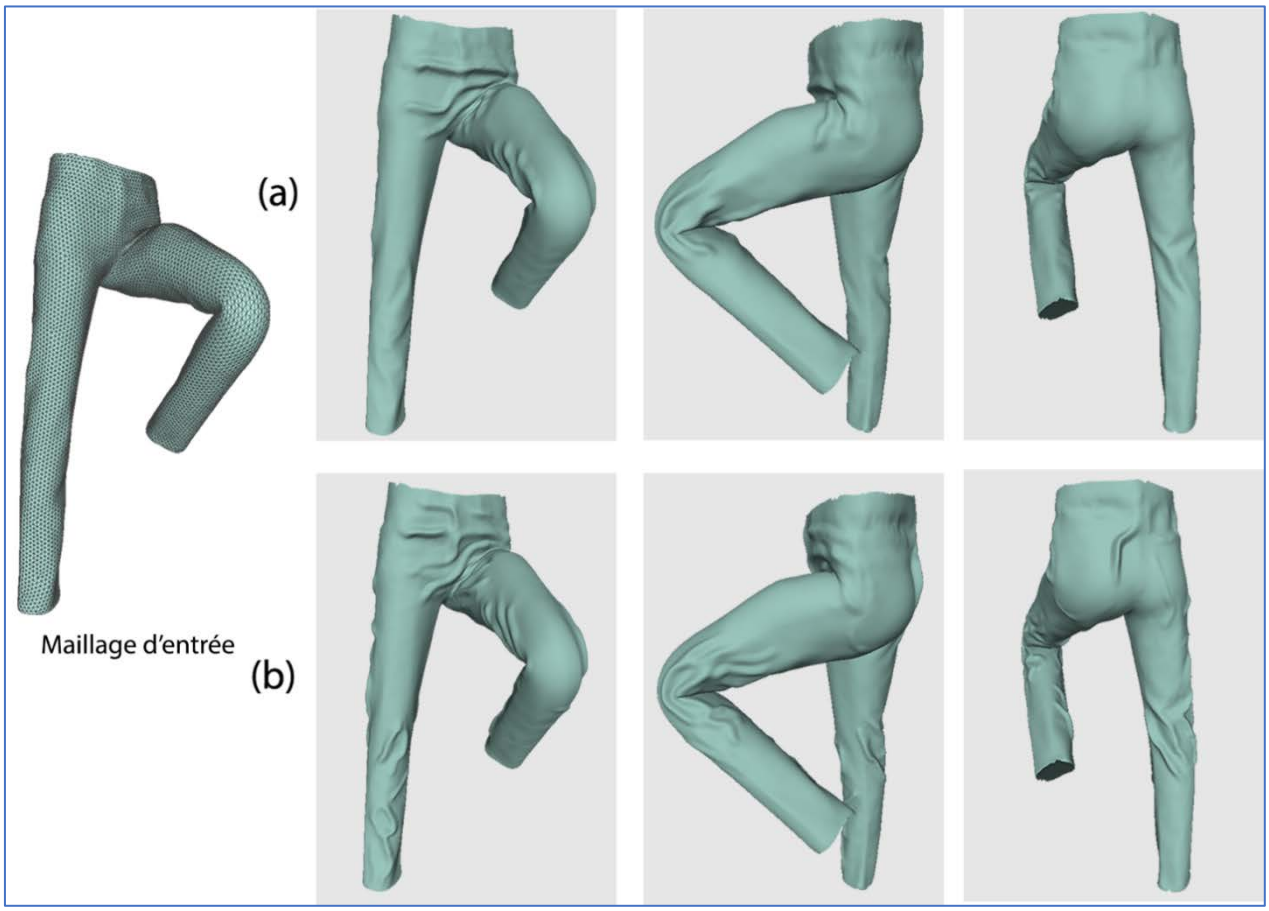


Figure 2-21 : Résultats d'ajout de plis pour un modèle de pantalon avec (a) $\gamma = 75$ **et (b)** $\gamma = 117$

2.5.2.3. Application sur des modèles en différentes résolutions

Comme illustré sur la figure 2.22, nous avons présenté les résultats d'application de notre approche sur trois modèles de chemise avec différentes résolutions, habillés par un même modèle de personnage. Les modèles de chemise sont issus de la base de *GarNet dataset* [56]. La simulation pour les trois modèles a été effectuée avec les mêmes paramètres d'entrée ($\gamma = 75$, $\tau = 0.39$).

D'après ces résultats, nous pouvons remarquer que le paramétrage que nous avons utilisé lors de la création de plis est mieux adapté aux modèles avec basse résolution. Nous pouvons aussi voir que le modèle avec la haute résolution est plus naturel, cela peut être parfaitement vu au niveau des articulations de la chemise ; par contre, le résultat du modèle à basse résolution est également satisfaisant. La seule explication de ces résultats, c'est que le nombre de sommets dans un maillage à un impact important sur le processus d'ajout de plis, en améliorant considérablement

le fusionnement de champs de plis sur la surface de vêtement, à chaque fois que la résolution du maillage augmente.

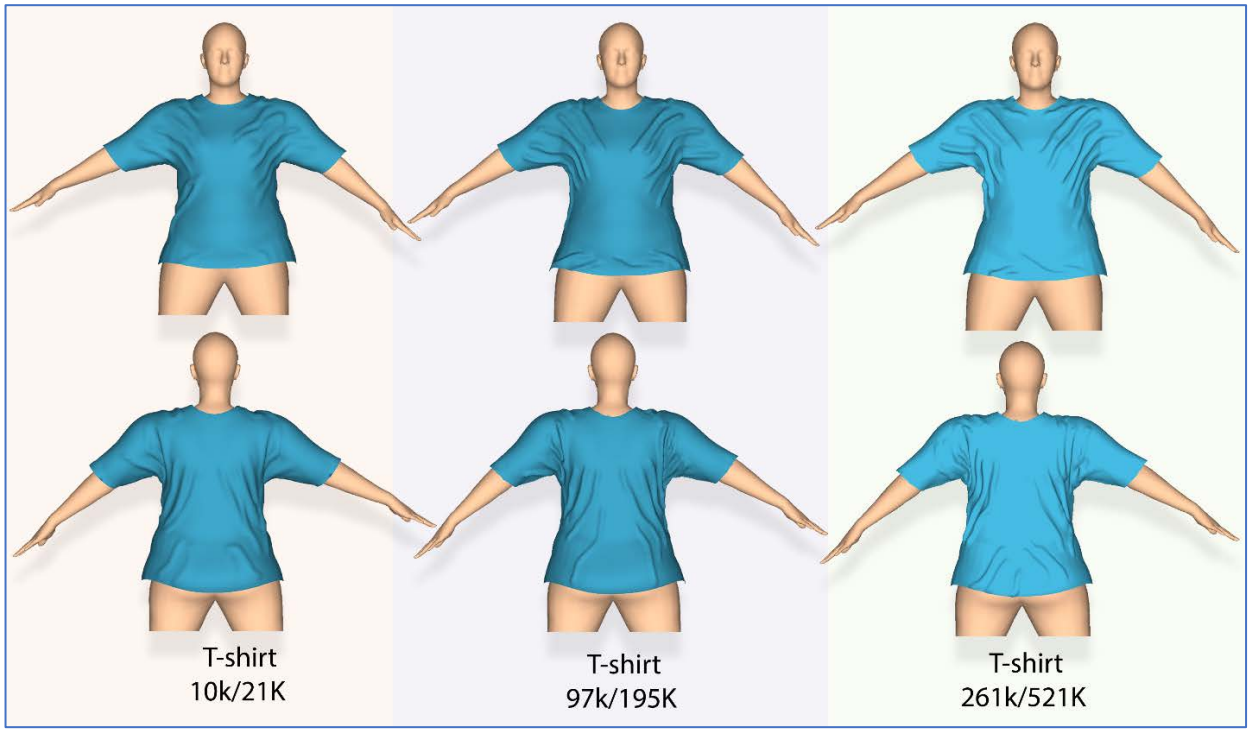


Figure 2-22 : Résultats d'ajout de plis sur trois résolutions d'un modèle de chemise ample ; Les statistiques représentent respectivement ; les sommets et les faces du maillage de chaque chemise

2.5.2.4. Apparence des plis lors de l'animation

Nous avons simulé l'ajout de plis sur une scène d'animation du vêtement porté par un personnage. Les trames de scène de cette animation ont été créées en utilisant le logiciel Blender [20]. Le modèle du vêtement utilisé issu de la base de *GarNet dataset* [56], correspond à un maillage non parfaitement développable. Nous avons également associé ceux-ci au corps du personnage sous le logiciel Blender.

La figure 2.23 montre trois trames successives d'animation d'un vêtement porté par un personnage animé. Les résultats sont présentés avant et après l'application de l'ajout de plis. Nous pouvons remarquer que le processus de synthèse de plis améliore la crédibilité de la visualisation ainsi que l'impression de dynamique. Notons que pour les vêtements des trois trames, la génération de plis est effectuée avec les mêmes paramètres d'entrée ($\gamma = 83$, $\tau = 0.4$). Ce paramétrage donne ainsi l'impression que le vêtement est constitué d'un tissu très fin de type soie avec de nombreux plis. D'après les résultats de simulation des trois trames illustrées sur la figure

2.23, nous pouvons noter que l'ensemble des plis ajoutés améliore nettement le dynamisme de l'animation du modèle.

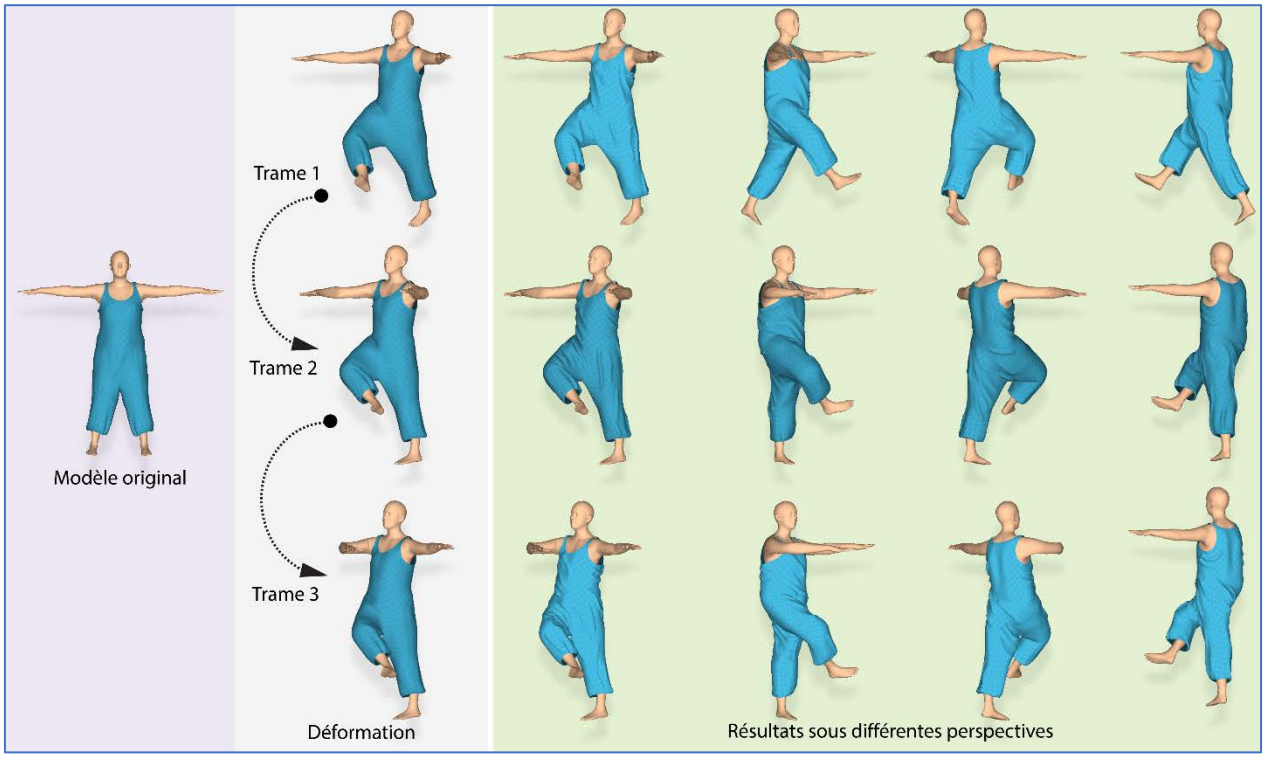


Figure 2-23 : Résultat d'animation d'un vêtement porté par un personnage pendant trois trames d'animation.

2.5.3. Comparaison et discussion

Dans l'objectif de déterminer la position de notre approche parmi les approches d'ajout de plis. Nous avons effectué une comparaison avec les approches récemment proposées dans ce contexte. Cette comparaison détaillée dans les tableaux 2.2 et 2.3, a été mené suivant six critères :

1. Les exigences de la méthode en matière de données d'entrée ;
2. Le type du maillage du vêtement pris en charge par la méthode ;
3. Le contrôle de la direction du froissement ;
4. La gestion de collisions des plis ;
5. Le contrôle d'utilisateur sur la forme des plis ;
6. L'automatisation de la méthode.

Approche	Exigence d'entrée	Modèles de vêtements supportés	Contrôle de direction des plis
Li et al. [94]	– Séquence d'animation (personnage habillé). – Contraintes de contact entre le corps et le tissu.	Différents types	Manquant
Han et al. [60]	– Base d'image 2D de vêtement.	Différents types	Manquant
Wang et al. [150]	– Croquis de conception en 2D. – Modèle de vêtements en pattern 2D.	Trois types de vêtements : Jupe, chemise, kimono	Les plis suivent le tracé de croquis
Santisteban et al. [124]	– Base de vêtements de taille unique avec un tissu spécifique.	Modèle de Jupe	Les plis dépendent de la pose du corps
Gundogdu et al. [56]	– Maillage de tissu en basse résolution. – Maillage du vêtement lisse. – Maillage de détails.	Modèles de vêtements amples	Manquant
Rohmer et al. [122] Gillette et al. [51]	– Maillage initial du vêtement comme référence. – Maillage du vêtement déformé.	Modèles de vêtements serrés	Les plis suivent le sens de la compression
Notre méthode	– Maillage du personnage. – Squelette d'animation. – Modèle du vêtement.	Modèles de vêtements avec une forme fermée	Les courbes de plis sont tracés suivant le mécanisme décrit en (Paragraphe 2.4.2)

Tableau 2-2 : Comparaison avec les méthodes similaires récemment publiées en termes d'exigence d'entrée, modèles de vêtements supportés et le contrôle de la direction des plis

Suite à cette comparaison, nous pouvons noter que les données d'entrée de la méthode de synthèse proposée sont les plus simple à obtenir, ce qui augmente l'applicabilité de notre méthode. De plus, elle est entièrement automatique, contrairement à l'approche de traçage de courbes proposée par Wang et al. [150]. Bien que l'approche proposée par [124] permet d'obtenir des résultats visiblement proches aux plis dans la vraie vie, elle est très limitée en matière de type de vêtements supportés (modèle semblable à la jupe).

Approches	Gestion de collision entre plis	Contrôle utilisateur	Méthode automatique ?
Li et al. [90]	Gérée à l'aide de contrainte de proximité	Manquant	Oui
Han et al. [60]	Manquant	Manquant	Oui
Wang et al. [150] Li et al [94]	Manquant	L'utilisateur trace l'esquisse d'entrée et définit les pattern 2D du tissu	Non
Santisteban et al. [124]	Pas entièrement géré	Manquant	Oui
Gundogdu et al. [56]	Non garanti	Manquant	Oui
Rohmer et al. [122] Gillette et al. [51]	Gérée par l'utilisation d'une distance de décalage	L'utilisateur contrôle la largeur et la profondeur des plis	Oui
Notre méthode	Gérée à l'aide de distance imposée entre les courbes (Paragraphe 2.4.3)	Notre méthode offre plusieurs paramètres de contrôle de plis : forme, densité, hauteurs ...	Oui

Tableau 2-3 : Comparaison avec des méthodes similaires

2.5.3.1. Comparaison aux méthodes physiques

Comme illustré sur la figure 2.24, nous avons évalué visuellement la qualité de nos modèles. Nous avons comparé nos résultats avec ceux des méthodes de simulation basées sur des lois physiques (chapitre 1). Pour cette comparaison, nous avons choisi les approches proposées par

[108, 90]. D'après les résultats de simulation, nous remarquons que les plis créés par l'approche de synthèse de plis sont assez proches de ceux de la simulation physique.

Nous notons qu'une comparaison exacte avec les méthodes physiques, n'est pas facile car les conditions requises ne sont pas identiques. En effet, dans le cas de la simulation physique, le tissu subit une importante subdivision [90]. Une telle subdivision du modèle de tissu masse-ressort permet de modifier son comportement et le rendre plus flexible et plus proche de la déformation d'un tissu dans la vie réelle. Malgré cela, les approches de simulation physique brute nécessitent un coût prohibitif en matière de temps machine [136].

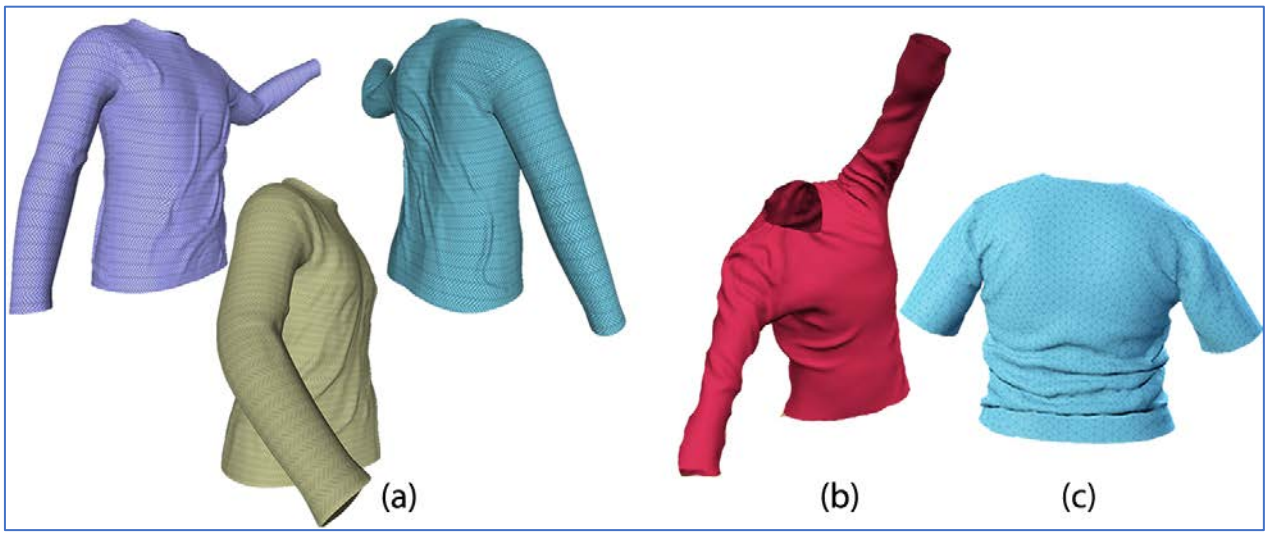


Figure 2-24 : Comparaison de nos résultats (a) avec deux méthodes de simulation physique (b) [108] et (c) [90]

Bien que notre approche s'inscrive dans la catégorie des approches qui utilisent la méthode d'enrobage pour déformer le modèle de vêtement, elle est différente au niveau de l'utilisation de l'étape de suivi de surface effectuée après une déformation standard (Paragraphe 2.3.3). Cette étape permet d'éviter deux problèmes majeurs causés par l'enrobage standard à savoir : l'auto pénétration dans le maillage après la déformation et l'effet d'élasticité extrême. Pour comparer la simulation générée à l'aide de la méthode de synthèse de plis avec celle des approches basées sur l'enrobage classique, nous avons choisi la comparaison avec la méthode de Guan et al. [55].

Pratiquement, nous avons effectué la comparaison avec deux simulations d'un modèle de pantalon (4718 sommets / 9283 faces) et une chemise (10116 sommets / 20017 faces) issu de la base de Multi-garment Network Dataset [19]. En utilisant la méthode [55], la transformation

considérable du corps rend le vêtement déformé dans un état fortement échevelé. Ceci représente un problème, car la résolution des auto-collisions dans un tel état n'est pas une tâche facile. De plus, une méthode classique d'enrobage peut également engendrer des compressions ou étirements irréalistes dans des parties du maillage (figure 2.25 (a)). En effet, la simulation physique d'un maillage sévèrement déformé loin de son état initial, conserve une grande énergie potentielle dans le système. Ce potentiel est converti en énergie cinématique qui augmente la vitesse des sommets, même si nous essayons de ramener le modèle de tissu donné par [55], à son état initial. C'est une tâche très difficile, car ce processus génère des oscillations excessives et des divergences de résolution dans le maillage. Par contre notre méthode permet de surmonter tous ces inconvénients causés par une simulation basée sur l'enrobage standard (figure 2.25 (b)).

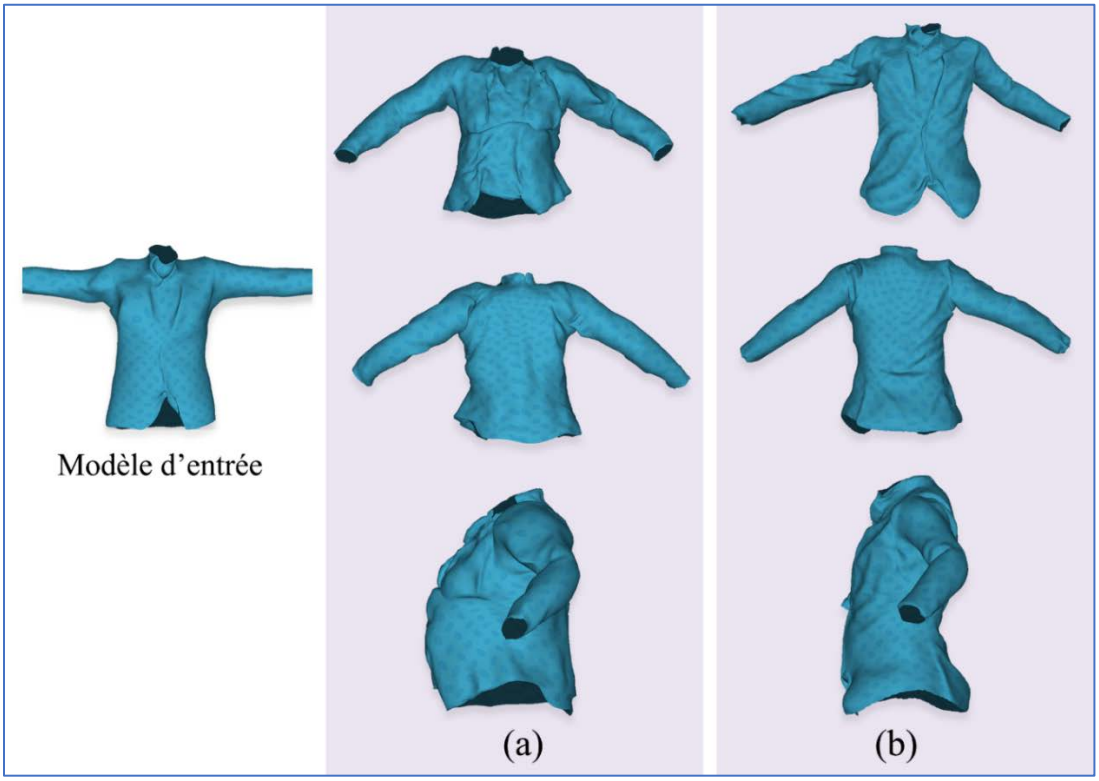


Figure 2-25 : Comparaison avec la méthode de [55] ; (a) Résultats de [55] ; (b) Résultats de simulation avec la méthode d'ajout de plis

2.5.3.2. Comparaison avec des méthodes à base de croquis

Les approches de [150, 94] reposent sur l'idée de créer des détails sur le vêtement à l'aide de croquis dessinés par l'utilisateur. Cependant, ces méthodes ne sont pas en mesure de simuler des détails sur un maillage de tissu préexistant en 3D, ni d'inclure des plis dans des endroits

spécifiques. En revanche, la méthode d'ajout de plis permet de traiter n'importe quel maillage de tissu lisse en 3D sans avoir besoin de "pattern" 2D (figure 2.26).

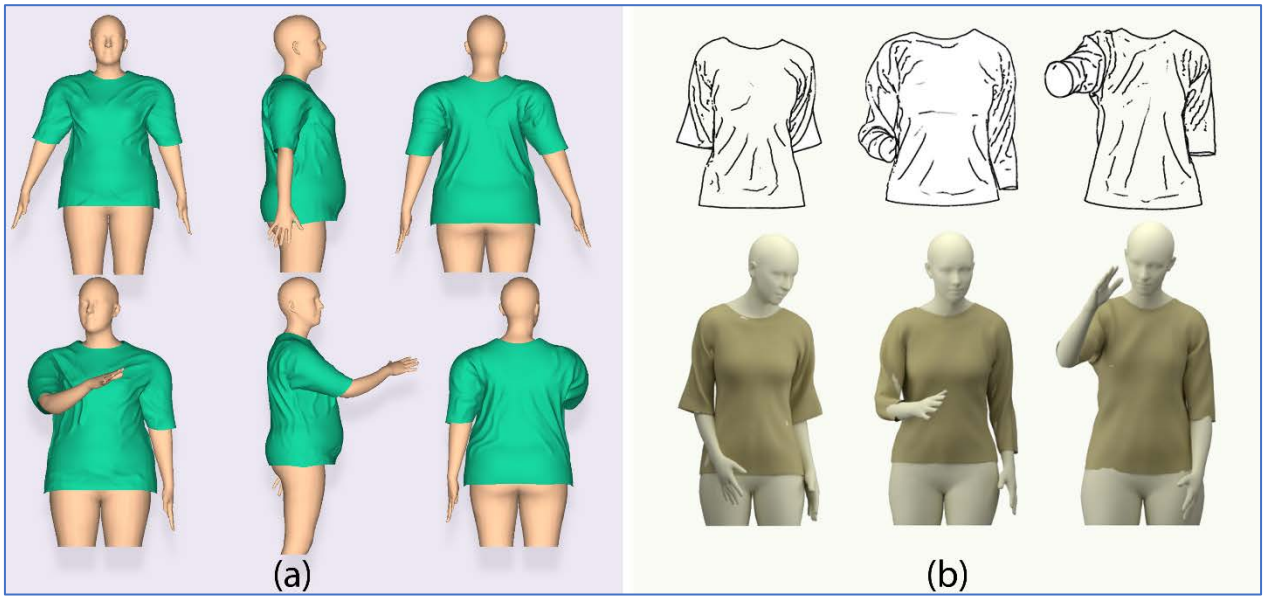


Figure 2-26 : Comparaison entre la méthode d'ajout de plis (a) et la méthode basée sur des croquis de Wang et al. [150] (b)

2.5.3.3. Comparaison avec des méthodes d'augmentation géométriques

Nous avons comparé les méthodes d'augmentation géométriques de plis [122, 51] avec notre méthode (figure 2.27). Ces approches génèrent des plis en se basant sur des courbes tracées dans l'espace de surface du tissu, où l'amplitude du champ de vecteurs qui reflète une quantité de compression. Elles reposent fortement sur l'existence d'un maillage de référence comme guide pour la génération des courbes de plis (Annexe A). Bien que nous ayons adopté la même stratégie de génération de courbes, notre proposition ne nécessite aucun maillage de référence.

Les plis dans la vie réelle ont des formes de profil complexes, ils varient considérablement tout au long de la surface du vêtement ; ainsi, comme le montre la figure 2.27 (a) et (b), on remarque la présence des plis de taille moyenne avec un ajustement global dans les résultats de [122, 51]. Ainsi, nous pouvons remarquer dans nos résultats, la présence de plis plausibles dans la région du ventre, ils apparaissent lorsque le personnage lève la main. En revanche, les résultats produits par [122, 51] ne fournissent qu'une approximation grossière des plis dans cette région.

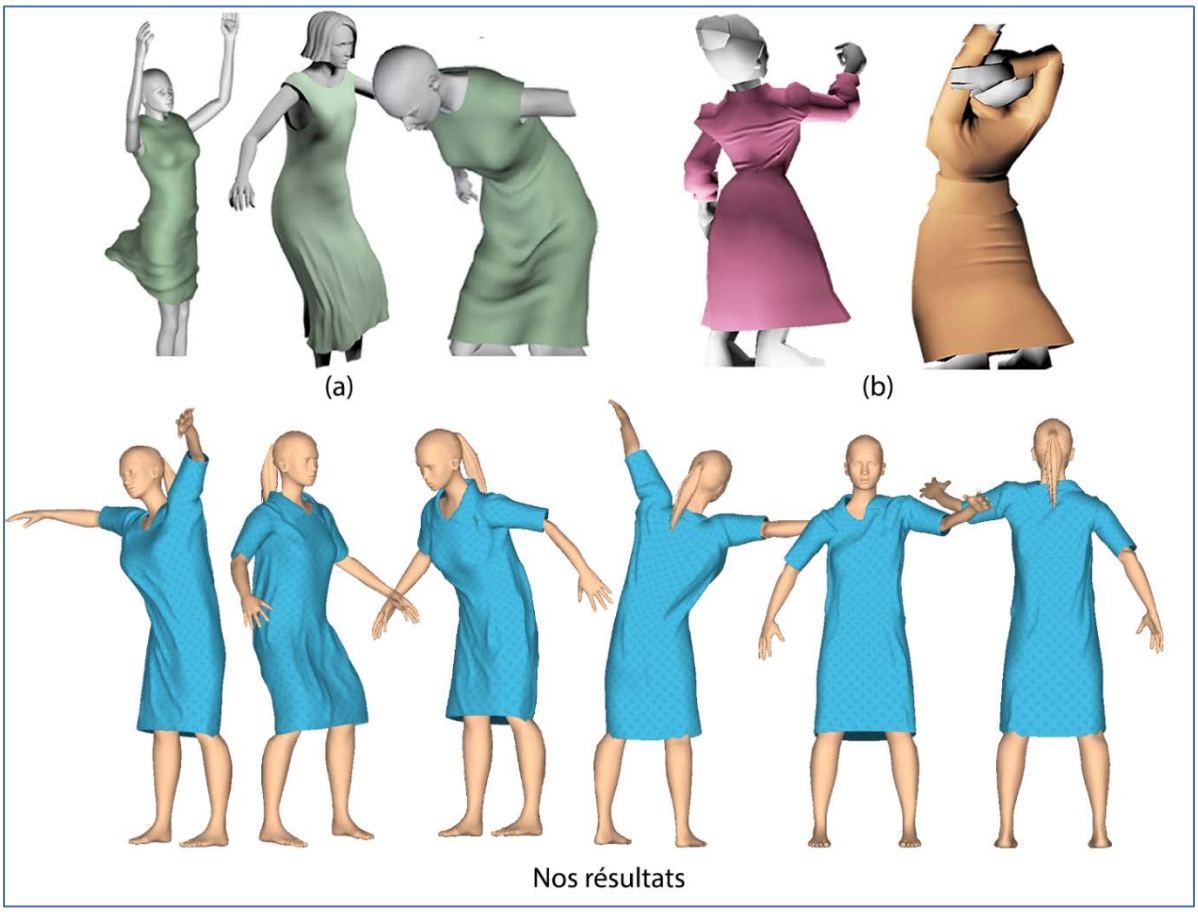


Figure 2-27 : Comparaison avec les méthodes d'augmentation géométrique ; (a) proposition de [122] ; (b) proposition de [51]

2.5.3.4. Comparaison avec des méthodes de *Data-driven*

La figure 2.28, montre une comparaison qualitative avec les méthodes en *"Data-driven"* récemment proposées [148, 140, 120]. Ces méthodes ajoutent des plis au tissu en utilisant une interpolation des échantillons pré simulés de plis (*Annexe* ***A***). Bien que les résultats de ces approches puissent être visuellement crédibles, il est important de noter que la forme et l'apparence de ces plis dépendent largement de la taille de la base de données. En plus, l'idée de l'utilisation d'échantillons donne aux plis une apparence statique lors de l'animation. En outre, les méthodes en *"Data-driven"* sont plus appropriées pour plisser une animation de tissu avec une conception et des poses similaires aux échantillons dans la base. Par contre, la méthode d'ajout de plis permet d'atteindre un niveau de précision de plis important, et elle ne nécessite aucune base d'échantillons, ni de base d'images de tissu comme dans la proposition de [59].

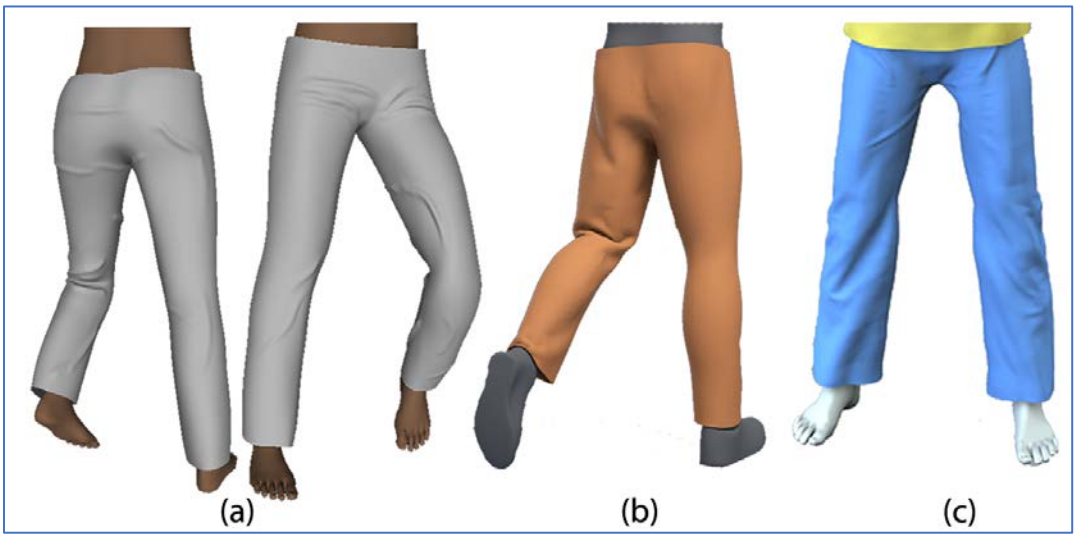


Figure 2-28 : Comparaison de la simulation d'ajout de plis(a) avec les résultats des approches en data-driven (b) [59] ; (c) [140]

2.6. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté une méthode pratique pour ajouter des plis au tissu porté par un personnage animé. La méthode proposée fonctionne comme une étape de post-traitement du maillage de vêtement déformé. Nous avons détaillé ses différentes étapes, puis nous avons présenté les résultats obtenus sur un ensemble de modèles de vêtements. Nous avons aussi, comparé ces résultats avec ceux des autres méthodes récemment publiées dans ce contexte. Les résultats des simulations et des comparaisons sont très satisfaisants. Les différentes expérimentations effectuées sur des maillages de vêtements avec différents paramètres de contrôle de plis montrent, d'une part, la qualité de la simulation produite par la méthode d'ajout de plis et d'autre part, l'impact de ce paramétrage sur les résultats obtenus. Les résultats sont encourageants surtout que la méthode proposée s'adapte parfaitement avec les vêtements qui enveloppent le corps de personnage animé. Comme le montrent les résultats de simulation, l'utilisation de la reconstruction HRBF comme moyen d'ajout de plis au maillage a prouvé son efficacité pour simuler des plis avec un aspect réaliste, ainsi de bien gérer les auto-collisions dans la région de plissement et de préserver les détails originaux de la forme initiale du maillage. Notre méthode fournit un ensemble de paramètres manipulables par l'utilisateur afin de contrôler l'apparence des plis résultants et ainsi d'obtenir le résultat souhaité. L'approche que nous avons proposée est plus rapide qu'une simulation physique classique.

Chapitre 3

Positionnement de vêtements 3D sur un corps humain à l'aide du squelette d'animation et des fonctions à base radiale d'Hermite.

3.1. Introduction

La récente explosion des réseaux sociaux pousse les gens à redoubler le temps d'interactivité en ligne. Par conséquent, le niveau d'interactivité des consommateurs en ligne avec les entreprises de vêtements augmente avec une large utilisation des applications d'achat en ligne, de divertissements et des cabines d'essayage virtuelles. L'essayage virtuel contribue fortement à l'acte d'achat en ligne des vêtements par les consommateurs. Ainsi, les techniques de modélisation 3D sont largement utilisées dans ce contexte, en particulier pour automatiser le positionnement personnalisé, la prédiction de la taille et le prototypage des vêtements. Un bon positionnement d'un modèle du vêtement 3D sur un corps humain est une étape cruciale pour les applications d'essayage virtuel.

Ce processus de positionnement nécessite de nombreuses tâches qui prennent beaucoup de temps, principalement à cause de la différence au niveau de la structure et de la posture entre le modèle du corps cible et le vêtement. La recherche en essayage virtuel est devenue un sujet d'actualité dans le domaine de la réalité virtuelle. Au cours des dernières années, il y a eu un grand nombre de propositions dans ce sujet, qui peuvent être classés en deux catégories : premièrement, les approches basées sur la modélisation par morceaux de tissu 2D [76, 156]. Ces approches utilisent des applications CAO (*Conception assistée par ordinateur*) pour superposer des modèles 2D sur la surface du corps qui sont ensuite convertis en maillage 3D. Malgré les résultats convaincants des données CAO dans le positionnement et la simulation des vêtements, ces approches nécessitent une grande base de données de morceaux de tissu 2D qui n'est pas toujours disponible dans les applications d'essayage. Deuxièmement, les approches qui effectuent le positionnement directement à partir des maillages 3D de vêtements [110, 87, 128]. Ces approches requièrent en entrée, un maillage du vêtement porté par un corps de référence et le maillage du corps cible. Ces

approches s'intéressent principalement à la recherche de la correspondance entre le corps de référence et le corps cible. Cependant, sans la présence du modèle de référence, ces méthodes ne sont pas applicables.

En général, un système d'essayage virtuel doit répondre à cinq critères importants. Premièrement, le vêtement doit s'adapter au modèle humain dans différentes postures. Deuxièmement, le résultat du positionnement doit indiquer les caractéristiques intrinsèques du vêtement. Troisièmement, le système d'essayage virtuel est censé assurer un degré de contrôle pour l'utilisateur. Quatrièmement, les données d'entrée d'un tel système doivent être simples et disponibles, c'est-à-dire que les informations d'entrée doivent être faciles à obtenir. Cinquièmement, le temps d'exécution du système doit être suffisamment raisonnable pour une application interactive.

En s'appuyant sur les cinq critères cités ci-dessus, nous avons proposé un système d'ajustement virtuel basé sur la déformation par squelette du vêtement [161]. Afin d'assurer la correspondance de la posture entre le vêtement et le modèle humain, la déformation est effectuée avec l'approximation HRBF. En effet, nous représentons le maillage du vêtement en utilisant la convention de reconstruction HRBF (chapitre 2 paragraphe 2.3). Cette approximation est ensuite utilisée pour guider la déformation du vêtement, ce qui permet d'éviter l'utilisation d'un corps de référence supplémentaire pour déformer le vêtement.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit : le paragraphe 3.2 présente un aperçu général de la méthode de positionnement. Le paragraphe 3.3 expose le processus d'intégration du squelette dans le maillage du personnage et du vêtement. Dans le paragraphe 3.4, nous avons détaillé les différentes étapes d'alignement de la posture du vêtement avec celle du personnage. Le paragraphe 3.5 décrit les étapes de transfert du vêtement vers le modèle humain. Le paragraphe 3.6 expose les différents résultats d'application de la méthode de positionnement ainsi que les résultats de comparaisons avec les autres méthodes similaires. Le paragraphe 3.7 présente les performances en temps d'exécution de la méthode.

3.2. Aperçu général sur la méthode de positionnement

En général, la déformation des vêtements suit de près la déformation du corps humain. Ce qui permet de traiter directement les modèles de vêtements comme des modèles articulés. Parmi une grande variété de méthodes, la déformation par squelette est considérée comme la méthode la

plus intuitive et la plus facile à utiliser pour l'ajustement de la posture d'un modèle 3D (chapitre 1 partie 1.4.2.4).

Dans ce paragraphe, nous décrivons un nouveau système de positionnement de vêtements sur un modèle du corps humain 3D. Le pipeline de la méthode de positionnement est illustré sur la figure 3.1. En entrée, le système de positionnement proposé requiert seulement un modèle du corps humain et un modèle du vêtement. Le modèle humain peut provenir de diverses sources (modélisation 3D, scanner …), nous ne supposons donc pas une relation de correspondance initiale entre les deux modèles. Comme idée de base, nous déformons le modèle du vêtement afin qu'il soit aligné avec le corps cible. Pour cela, nous commençons par intégrer des squelettes dans les maillages des deux modèles (corps et vêtement), ensuite, nous appliquons une série de opérations d'alignement et d'ajustement de longueur sur le squelette du vêtement afin qu'il soit aligné avec celui du corps humain.

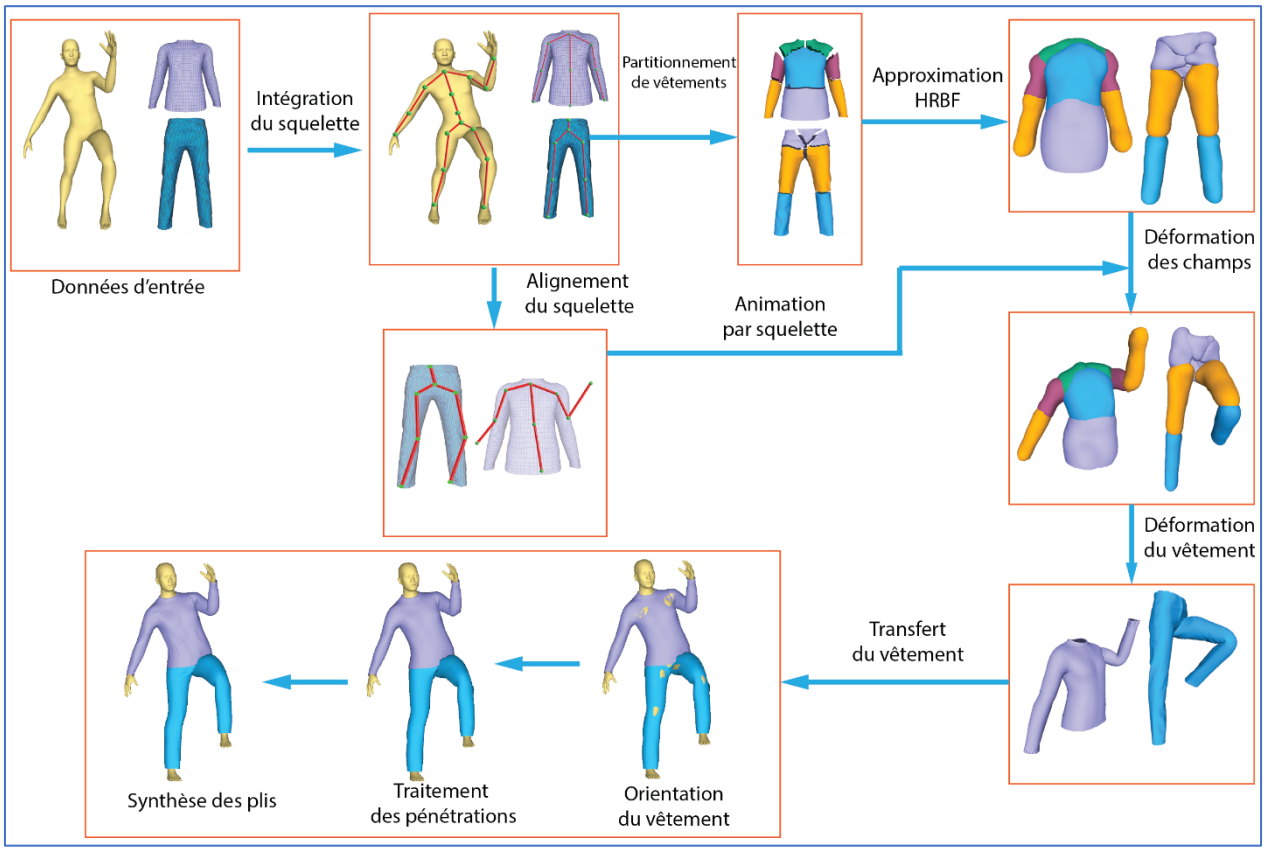


Figure 3-1:Pipeline de la méthode du positionnement.

La plupart des approches dans ce contexte adoptent l'idée du transfert de vêtements vers le modèle humain [142, 105 27]. Elles sont basées principalement sur quatre grandes étapes, à

savoir la manipulation de la pose du modèle humain, la correspondance entre les formes, le positionnement du vêtement sur le modèle humain et la gestion des collisions entre les deux modèles. Nous pouvons remarquer que la simple hypothèse que le corps humain et le vêtement ont une posture similaire, comme il est supposé dans les travaux de [105, 27], n'est pas toujours réalisable dans les applications d'essayage de vêtements.

La déformation d'un maillage en suivant la posture d'un autre maillage peut être vue comme un problème du recalage de formes 3D non rigides (*non-rigid 3D shape registration*) dont l'objectif est de trouver la correspondance entre les formes. Dans un recalage 3D parfait, le modèle du vêtement peut être déformé vers une posture exactement identique à celle du modèle humain. Cependant, la plupart des méthodes de recalage non-rigide ne garantissent pas une correspondance exacte de posture ; ainsi, la gestion des pénétrations entre les deux maillages peut être difficile à réaliser.

Bien que les méthodes de recalage 3D non rigide soient un choix intuitif, nous adoptons une approche de déformation par squelette guidée par une approximation HRBF pour déformer le vêtement. Cette déformation permet de réduire l'impact de la contrainte de correspondance. En effet, lorsque les deux modèles ont des postures presque similaires, l'étape de gestion des pénétrations sera plus facile.

Comme le montre la figure 3.1, le pipeline d'ajustement se compose des étapes suivantes :

1. **Intégration du squelette.** Dans un premier temps, nous intégrons deux squelettes ayant exactement la même structure, dans les deux maillages (vêtement et corps). Une fois l'intégration réussie, le calcul de l'attachement d'enrobage (skinning) de chaque maillage avec son squelette est effectué à l'aide de l'approche basée sur le graphe de Reeb et la théorie de Morse [61].
2. **Approximation HRBF du vêtement.** Dans cette étape, nous segmentons le maillage du vêtement en partitions selon le poids d'influence de chaque os sur les sommets du maillage. Ensuite, nous utilisons l'approximation HRBF pour représenter les parties du vêtement avec une surface implicite par morceaux (chapitre 2 paragraphe 2.3).
3. **Alignement des squelettes et déformation du vêtement.** L'alignement du squelette du vêtement avec celui du corps nécessite le calcul des rotations appropriées pour chaque articulation. Nous considérons la rotation d'articulation comme des composantes

d'oscillation et de torsion, qui sont calculées indépendamment. La transformation initiale de squelette du vêtement est effectuée en utilisant la méthode de déformation par DQS. La déformation du vêtement est guidée par le processus de suivi des sommets (chapitre 2 partie 2.3).

4. **Transfert du vêtement.** Une fois que la posture du vêtement soit alignée avec celle de modèle humain, nous corrigeons toutes les pénétrations probables entre le corps et le vêtement. Enfin, nous effectuons un ajout de plis sur le maillage du vêtement, afin d'obtenir une forme du modèle plus réaliste.

3.3. Intégration du squelette dans les maillages

Pour intégrer un squelette d'animation à l'intérieur du personnage, nous avons essayé d'utiliser une technique de boîte noire pour l'intégration automatique de squelette (*black-box rigging*) [58], mais c'est loin d'être un bon choix dans notre cas. Nous pouvons noter que la technique d'intégration automatique (*automatic rigging*) proposée par Baran et al. [16], a réussi pour la plupart des modèles avec une symétrie verticale. Cependant, pour les modèles asymétriques, comme dans le cas des vêtements déformés, cette technique produit des résultats inappropriés qui demandent une intervention de l'utilisateur à chaque fois pour corriger les positions des articulations. Même les solutions disponibles dans les outils professionnels présentent divers problèmes d'intégration de squelette, car elles demandent un haut degré d'expertise de la part de l'utilisateur. Pour cela, nous avons décidé d'adopter un nouveau système d'intégration de squelette.

Nous avons mis en place un système similaire à la proposition de Pasko et al [109], qui est basé sur le graphe de Reeb et la théorie de Morse [61]. En utilisant la fonction de Morse comme distance géodésique de deux points sur la surface, cinq points caractéristiques du modèle sont d'abord extraits automatiquement. Le modèle est ensuite partitionné, et toutes les articulations sont calculées en évaluant la fonction circulaire des lignes géodésiques du modèle. Cependant, en suivant ce processus, nous avons remarqué que parfois plusieurs points caractéristiques sont obtenus en position près d'une articulation, et ce problème n'a pas été résolu dans la proposition de [109]. Nous avons résolu ce problème en utilisant l'algorithme de clustering K-means [147] pour obtenir un seul point à chaque articulation. En utilisant les étapes ci-dessus, le système de positionnement est capable de spécifier automatiquement tous les points d'articulation. Ces

articulations peuvent nécessiter un ajustement manuel, en particulier pour les modèles dont la pose est non canonique. De la même manière, la position des articulations sera encore manipulée par l'utilisateur si les rotations des articulations entraînent une distorsion inhabituelle du maillage. La figure 3.2 illustre les résultats générés par la proposition de Baran et al. [16] et par notre méthode. Nous pouvons noter que les points caractéristiques se trouvent à l'intérieur du modèle, et non sur la surface du maillage.

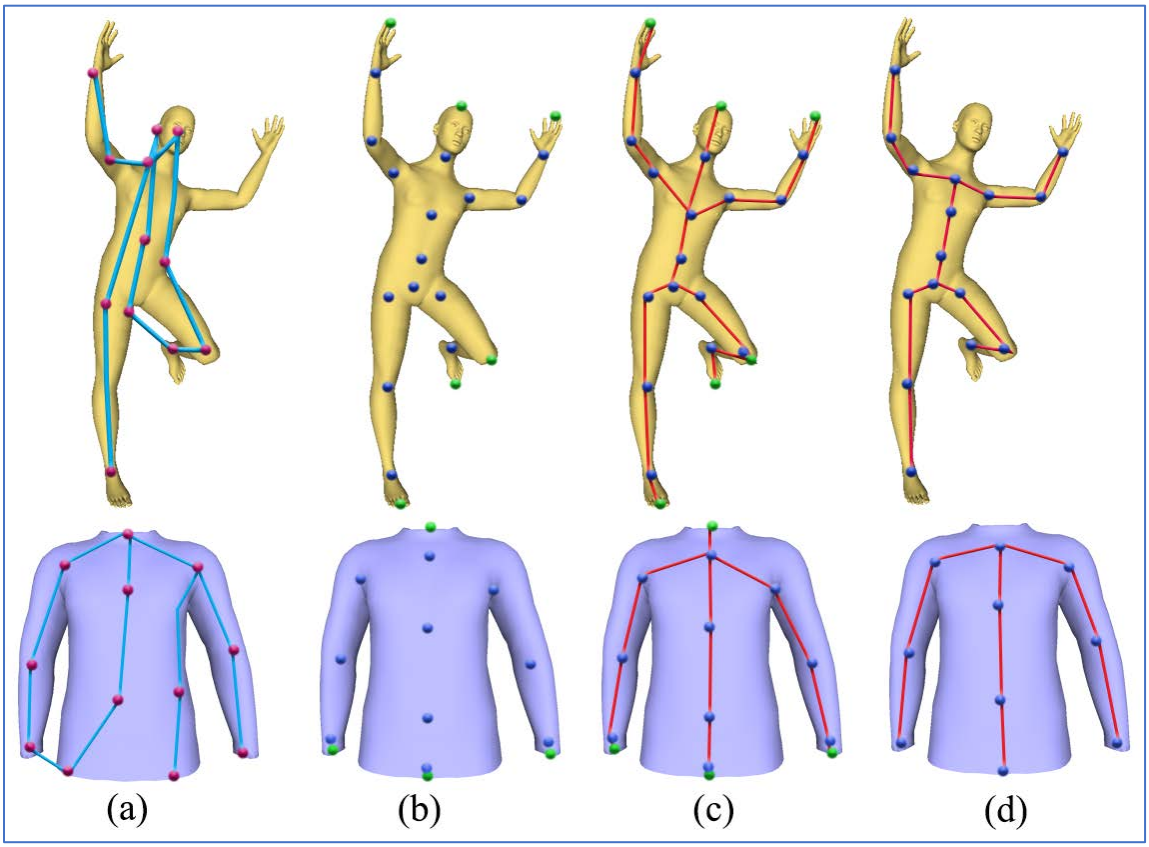


Figure 3-2: (a) Squelette intégré avec l'approche [16] ; (b) L'extraction de points caractéristiques (vert), puis l'ajout de points supplémentaires comme jointures (bleu) ; (c) le squelette conçu en joignant automatiquement ces points ; (d) le squelette résultant

3.4. Alignement de la posture du vêtement avec celle du corps

L'objectif de cette étape est de déformer le vêtement pour qu'il s'adapte à la posture du modèle humain. Le principal défi est de déformer le vêtement sans perte de volume ni auto-intersection au niveau des articulations. Notre idée clé est d'exploiter la capacité des représentations implicites pour modéliser le contact et préserver les propriétés originales du maillage à l'aide des surfaces implicites. Dans cette contribution, nous avons suivi le même processus de déformation du vêtement utilisé dans la méthode d'ajout des plis présentée dans le chapitre 2. Nous avons donc

partitionné le maillage du vêtement suivant les articulations de son squelette. Puis, nous avons utilisé les fonctions HRBF pour représenter chaque segment du maillage avec l'iso-surface 0,5 d'une fonction de champ scalaire lisse f_i. Ensuite, nous combinons ces fonctions de champ scalaire f_i pour obtenir une fonction de champ scalaire unique F.

Après l'approximation du vêtement, le processus de déformation commence par une étape d'alignement d'orientation du squelette avec celui du corps cible, ce qui nous donne à la fin la nouvelle posture du vêtement qui est similaire à celle du corps.

3.4.1. Alignement des squelettes

En informatique graphique, une rotation 3D est généralement constituée de plusieurs composantes, elle peut être représentée en différentes manières (par exemple, la représentation de l'angle d'Euler).

Dans notre cas, nous décomposons la rotation R de l'articulation en deux composantes, à savoir l'oscillation (swing) et la torsion (twist) : $R = ST$, où la partie d'oscillation S est la rotation d'un os b par rapport à la normale du plan défini par l'intersection de b avec son os parent, et la partie de torsion T est la rotation de l'os b par rapport à son axe.

Pour chaque articulation de squelette, les deux composantes sont alignées séparément en utilisant différentes techniques. Nous présentons d'abord la technique permettant d'obtenir l'oscillation à partir de deux postures du squelette, puis nous décrirons celle utilisée pour obtenir la torsion.

En algèbre linéaire, deux opérateurs M et N sous une base différente, sont dits similaires s'il existe une matrice non singulière P telle que : $N = P^{-1}MP$.

Pour le cas du mouvement des os du squelette, nous notons M la rotation d'un os b par rapport au repère global, P l'orientation de l'os parent de b et N la même rotation de b représentée par rapport à son os parent. La transformation inverse de b est donnée comme suit :

$$M = PNP^{-1} \quad (3.1)$$

Cette transformation inverse permet de transformer une représentation dans un repère local vers un repère global. Dans ce contexte, nous voulons ajuster les orientations de squelette du vêtement afin qu'ils correspondent à celle du corps cible.

Nous initialisons d'abord chaque os par une rotation locale R_{init}. Bien que nous puissions choisir arbitrairement les rotations R_{init}, nous les avons choisis alignés avec le repère global afin de faciliter le processus de suivi. L'algorithme 1 représente un pseudo-code de l'ajustement de la partie oscillante. Pour le symbole $R^t_{p(i)}$, l'exposant t indique la rotation totale d'un os (combinaison des rotations de ses os associés), par rapport au repère global, et l'indice $p(i)$ indique le parent de l'os b_i. Nous pouvons noter que le squelette intégré utilise un degré de liberté (DOF) faible, c'est-à-dire que le degré de liberté de chaque articulation (ou os) n'est pas égal à six, car nous ne disposons pas d'information sur l'orientation. Par conséquent, la matrice M_j utilisée dans l'étape de dépouillement par quaternion double (Annexe C) ne peut pas être initialisée correctement pour la pose de départ. En d'autres termes, les informations d'oscillation (swing) ne sont pas suffisantes pour définir la torsion (twist) d'un os, et ne peuvent donc pas décrire la posture de l'os avec précision. Cela pose également des problèmes lors du reprofilage du mouvement, même avec l'aide d'un expert.

Afin de générer la torsion des os d'un squelette à faible degré de liberté, nous utilisons des données de mouvement ou de pose capturées à l'aide d'enregistrement de l'orientation de chaque os. Plus précisément, en utilisant le système de capture du mouvement, nous prenons comme données d'entrée, la première pose égale à celle de squelette du corps, puis la deuxième pose égale à celle de squelette du vêtement. Pour chaque paire d'os identique (par exemple deux jambes gauches), nous calculons la rotation relative et locale R_i^m pour passer de la pose de l'os du corps à celle de l'os du vêtement. Cette rotation relative est ensuite transformée en une représentation dans le repère global à l'aide de l'équation 3.1, puis elle est décomposée en deux parties : l'oscillation S_i^m et la torsion T_i^m. Nous combinons T_i^m avec S_i pour obtenir une nouvelle rotation $Q_i = S_i T_i^m$, et nous abandonnons S_i^m à cause de son faible impact.

Algorithme 3.1 : Alignement des squelettes
1. Créer une file d'attente U **2.** Ajouter b_0^g l'os de la racine de squelette du vêtement à U ainsi que tous ces os descendants.

3. Initialiser les rotations des os du vêtement : $R^g_{p(0)} = R_{init}$

4. Pour tout $b_i^g \in U$ **faire**

5. Calculer le vecteur unitaire u_i pour b_i^g // Ce calcul est effectué par rapport au repère global

6. Calculer le vecteur unitaire u_i^r pour un os b_i^b correspond dans le squelette du corps // par rapport au repère global

7. **Pour chaque paire** $\left(b_i^b, b_i^g\right)$ **faire**

8. Trouver l'axe de rotation $R_{axis} = u_i^r \times u_i$

9. Trouver l'angle de rotation $\theta = \arccos\left(u_i^r . u_i\right)$

10. Former la matrice d'oscillation S_i par rapport au repère global.

11. **Fin pour**

12. Calculer la torsion T_i^m à partir d'un système de capture de mouvement.

13. Calculer $Q_i = S_i T_i^m$

14. Représenter Q_i par rapport au repère local : $Q_i' = \left(R^t_{p(i)}\right)^{-1} Q_i R^t_{p(i)}$

15. Mettre à jour les orientations locales et globales : $R_i' = Q_i' R_{init}$ et $R_i^t = R^t_{p(i)} R_i'$

16. Ajouter à U tous les os descendants de b_i^g.

17. Fin pour

3.4.2. Déformation de vêtement

Après avoir calculé la rotation totale pour chaque os de squelette du vêtement, nous pouvons facilement le déformer pour obtenir une pose similaire à celle du corps. Pour cela, nous appliquons les transformations R_i^t de chaque os à son champ HRBF associé f_i. Cette étape de déformation est similaire au processus présenté dans le chapitre 2 (paragraphe 2.3.3). Dans le cas présent, la transformation est donnée par :

$$\begin{cases} f_i(p) = f_i\left(\left(R_i^t\right)^{-1} p\right) \\ \nabla f_i(p) = J_R\left(R_i^t\right)\nabla f_i\left(\left(R_i^t\right)^{-1} p\right) \end{cases} \quad (3.2)$$

où J_R est la matrice jacobienne de R_i^t .

Cette déformation est suivie d'une étape de relaxation tangentielle, afin d'améliorer le déplacement des sommets et d'éviter les lacunes causées par la projection des sommets (chapitre 2 paragraphe 2.3.3).

3.5. Transfert de vêtement

Dans le présent paragraphe, nous décrivons les étapes de transfert du vêtement vers le modèle humain. Après la déformation du maillage du vêtement. Tout d'abord, nous déplaçons le vêtement déformé vers sa partie correspondante dans le maillage humain de manière grossière en se basant sur les points caractéristiques des squelettes. Ensuite, nous éliminons les pénétrations probables entre les deux maillages. Enfin, nous effectuons une synthèse des plis sur le vêtement, afin d'obtenir une forme plus réaliste.

3.5.1. Ajustement de l'orientation du vêtement

Une fois que le nouveau modèle du vêtement déformé soit obtenu, sa posture sera alignée avec le modèle humain. Cependant, dans certains cas, l'orientation du vêtement et celle du corps ne sont pas forcément cohérentes, en d'autres termes, le maillage du corps ne fait pas directement face au vêtement, ceci est principalement dû à l'étape de déformation du vêtement. Pour éviter ce problème d'orientation, nous ajustons l'orientation du vêtement avec celle du corps après l'étape de déformation (figure 3.3).

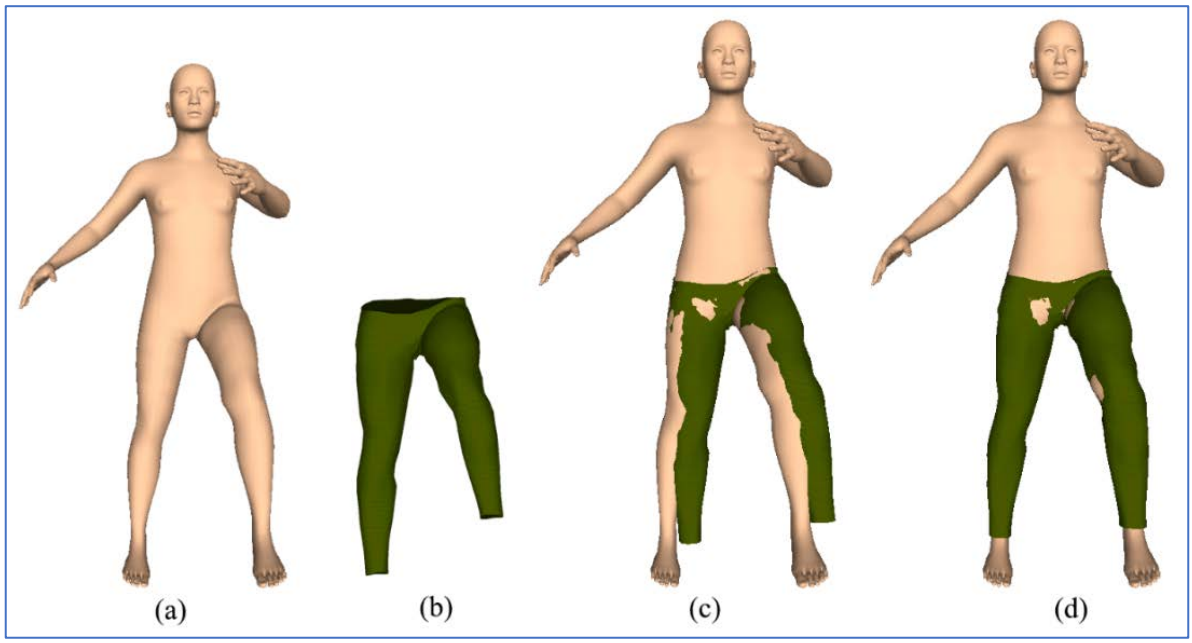


Figure 3-3 : (a) corps ciblé ; (b) vêtement déformé ; (c) alignement sans ajustement de l'orientation. (d) alignement après l'ajustement de l'orientation

L'orientation d'un modèle du vêtement peut être effectuée en utilisant un vecteur vertical V_v^g et un vecteur horizontal V_h^g. Par conséquent, suivant les articulations clés choisies dans les squelettes des deux modèles, comme le montre la figure 3.4, nous pouvons définir les orientations du vêtement et du corps respectivement comme suit : $D_g = \left(V_v^g, V_h^g\right)$ et $D_b = \left(V_v^b, V_h^b\right)$.

Le calcul des vecteurs d'orientation dans le cas de deux modèles s'effectue de manière similaire, si nous prenons comme exemple D_g, il peut être calculé comme suit :

$$D_g : \begin{cases} V_h^g = N\left(J_2^g - J_1^g\right) \\ V_v^g = N\left(J_3^g - \dfrac{J_2^g + J_1^g}{2}\right) \end{cases} \quad (3.3)$$

où la fonction $N(x)$ est la normalisation d'un vecteur x, et J_1^g, J_2^g et J_3^g sont les articulations clés de squelette du vêtement.

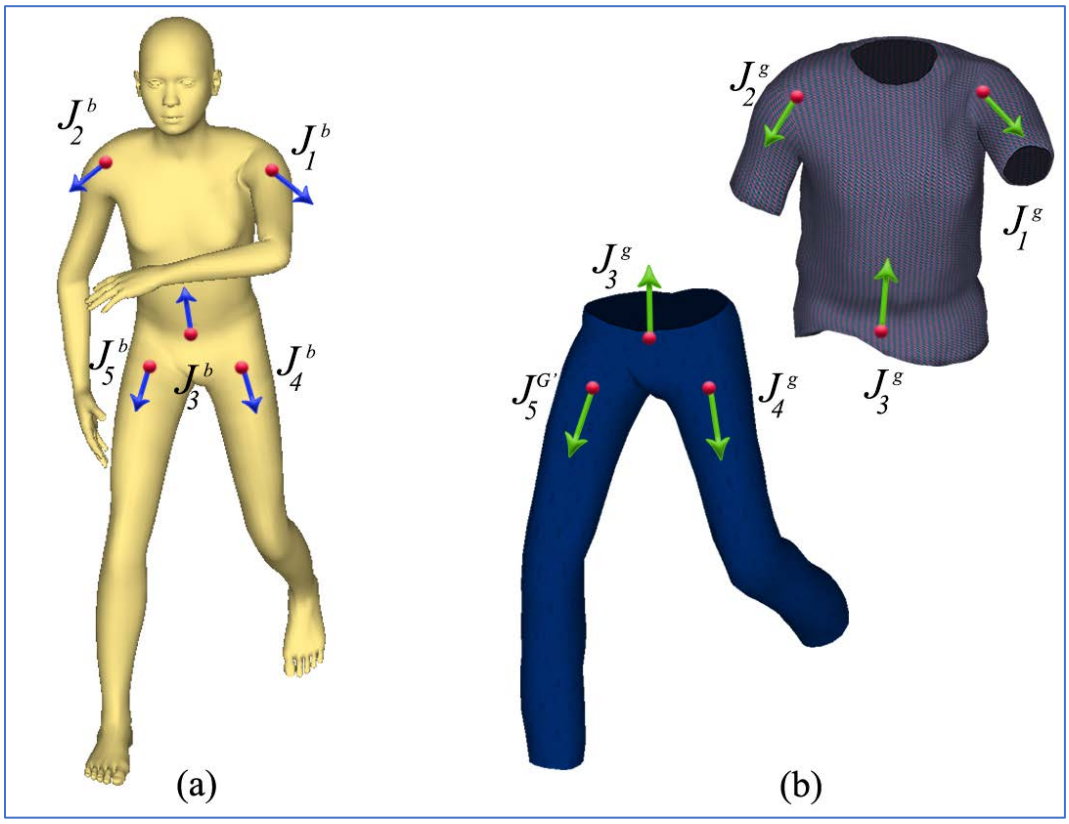


Figure 3-4 : Articulations utilisées pour le processus d'orientation ; (a) pour le corps ; (b) pour le vêtement déformé

Dans le processus d'orientation, nous définissons deux matrices de rotation R_v et R_h associées respectivement aux vecteurs V_v et V_h. Ainsi, nous appliquons R_h au vecteur V_h^g pour le rendre égal à V_h^b, et du même R_v est appliqué au vecteur V_v^g pour le rendre égal à V_v^b.

Nous adoptons le concept formule de rotation de *Rodrigues* [121] pour formuler ces deux rotations. Pour cela, nous avons besoin de deux paramètres : l'axe de rotation R_{axe} et l'angle de rotation θ, qui sont calculés comme suit :

$$R_{axe} = \frac{V_h^g \times V_h^b}{\left\| V_h^g \times V_h^b \right\|} \quad (3.4)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{V_h^g . V_h^b}{V_h^g \times V_h^b} \right) \quad (3.5)$$

Par conséquent, la rotation globale appliquée sur le vêtement peut être formulée comme la matrice $R = R_h R_v$. La figure 3.3 (d) ci-avant illustre l'ajustement final de l'orientation du vêtement avec celle du corps.

3.5.2. Gestion des pénétrations

Après que le modèle du vêtement soit déformé et positionné sur le modèle humain, le résultat obtenu peut être encore insatisfaisant, à cause des pénétrations qui apparaissent généralement entre les deux modèles (figure 3.5(a)). Ceci est dû à une correspondance insuffisante ou à la forme originale complexe du vêtement. Heureusement, les pénétrations peuvent être éliminées de manière simple par des algorithmes de gestion des collisions [155]. Nous éliminons ces problèmes par un ajustement de la forme du vêtement après l'étape d'orientation. Pour cela, nous avons besoin d'une méthode qui prend en compte à la fois le résultat de l'orientation et les pénétrations qui surgissent.

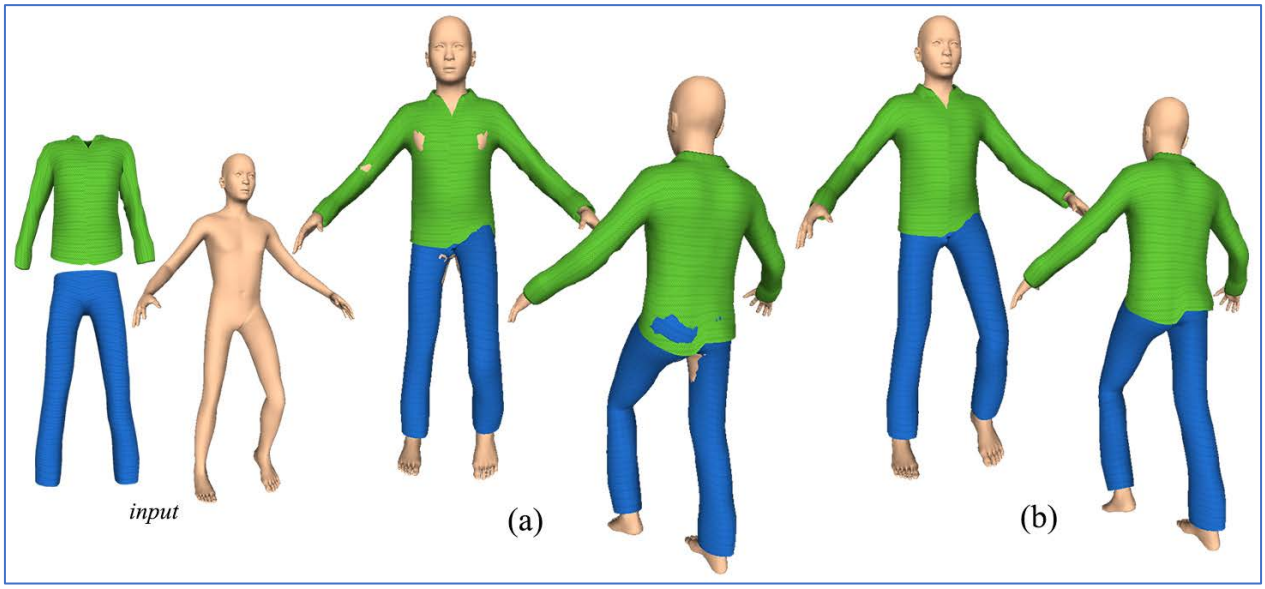


Figure 3-5 : Exemple de traitement de la pénétration ; (a) modèle avec des pénétrations ; (b) modèle après la correction des pénétrations

La proposition de Ye et al. [152] offre un cadre qui répond à nos exigences, ainsi nous l'avons adoptée dans notre système de positionnement. Nous pouvons noter que le succès de la correction des collisions entre deux maillages dépend essentiellement de leur structure géométrique. Or, cette approche basée sur le démêlage présente des limites liées à l'enregistrement (apprentissage) des collisions à chaque étape de déformation [152]. Davantage, l'utilisation de l'étape de

déformation du vêtement comme post-traitement et par la suite l'étape d'orientation permet d'augmentent les chances de convergence de cette approche.

Nous pouvons noter que le maillage de modèle humain peut être aminci jusqu'à ce que son squelette coïncide avec celui de vêtement, ce qui diminue davantage le nombre des régions de pénétration à éliminer. Dans nos expériences, l'amincissement (modification des proportions du maillage) est rarement effectué, sauf dans certains cas extrêmes.

La figure 3.5 montre que le vêtement aligné avec le corps est affecté par des pénétrations dans plusieurs régions. Nous pouvons noter qu'avant d'appliquer le processus de résolution des pénétrations entre le vêtement et le corps, nous avons réduit le volume proportionnelle du corps de 5%. Ceci permet de déminuer le nombre des pénétrations et rendre leur élimination plus facile.

3.5.3. Apparence du vêtement

Comme illustré sur la figure 3.5 (b), lorsque les opérations de l'ajustement du vêtement et de l'élimination des pénétrations avec le corps soient terminées, on obtient un modèle humain habillé. Cependant, l'apparence de ce modèle résultant peut être vue comme irréaliste à cause de l'absence des détails (plis) sur la surface du maillage de vêtement.
Dans un système de positionnement, toute variation du vêtement doit générer une apparence réaliste du tissu. Cela diverge totalement des autres approches de déformation géométrique [157, 93, 87], qui ajoutent des faux plis au vêtement pour lui donner une apparence plus proche de la réalité.

Nous avons utilisé la méthode de synthèse de plis (chapitre 2), qui permet de profiter de l'existence des champs HRBF utilisés dans la déformation du vêtement, pour générer des plis sur la surface du maillage. En effet, en calculant l'angle entre les gradients de deux champs HRBF successifs, elle génère un champ vectoriel utilisé ensuite pour tracer des courbes de plis. Ces courbes de plis sont transformées en plis géométriques à l'aide des surfaces de convolution. La figure 3.5 illustre le modèle du corps habillé après l'application de l'étape d'ajout de plis.

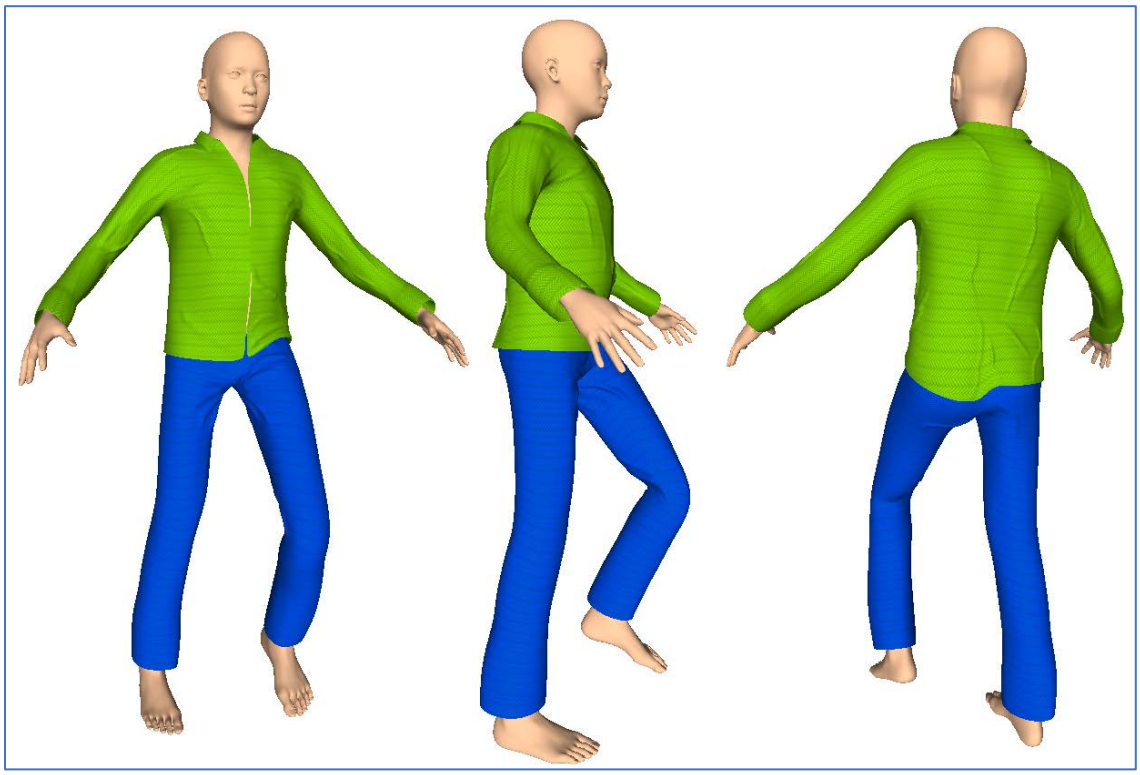


Figure 3-6 : Modèle final après l'application du processus de synthèse des plis

3.6. Résultats et validation

Dans ce paragraphe, nous montrons l'efficacité et la robustesse du système de positionnement proposé avec son application sur une série de modèles de corps humain et de vêtements différents. Nous utilisons 18 modèles de vêtements provenant de trois sources : *GarNet* [56], *Multi-garment Network* [19] et un logiciel de modélisation 3D [20]. Nous utilisons dix-sept modèles humains issus des bases de données *SMPL* [98], *SCAPE* [9] et du logiciel *MakeHuman* [102]. Nous avons testé notre système avec différentes configurations d'ajustement à savoir : le cas du corps habillé par différents types de vêtements et le cas du modèle de vêtement positionné sur plusieurs corps. En considérant chaque positionnement d'un ensemble de vêtements sur un corps comme une simulation, nous avons effectué au total 38 tests de simulation.

D'après nos expériences, il n'y a que quelques cas qui sont générés avec certains problèmes. Nous pouvons noter que certains modèles du corps humain nécessitent plus d'intervention manuelle de la part de l'utilisateur afin que le squelette soit correctement intégré. Certains modèles du vêtement issu de la base de SMPL sont plus compliqués, ce qui rend l'auto-extraction des positions d'articulation moins satisfaisante, d'où la nécessite de la manipulation manuelle de ces

articulations par l'utilisateur. Pour la plupart des modèles issus des bases de *GarNet* et *Multi-garment Network*, les résultats du processus de déformation HRBF sont plus satisfaisants.

3.6.1. Résultats des simulations

- **Habillage de corps avec différentes formes du maillage**

La figure 3.7 montre les résultats de positionnement de deux modèles de vêtements (T-shirt, pantalon), sur trois modèles humains avec une même posture et des formes différentes (mince, standard, gros).

Les spectres de déplacement illustrés à droite de la figure 3.7, montrent les régions de vêtements affectées par la déformation et la synthèse des plis. Dans la plupart des systèmes d'essayage virtuel, le corps cible est généralement issu d'une capture corporelle 3D (scanner), les postures numérisées des utilisateurs sont principalement en position A ou T. Nous pouvons noter que dans ce cas, l'intégration du squelette est réalisée facilement à cause de la structure simple de ces postures, bien qu'un petit ajustement dans certains cas soit nécessaire.

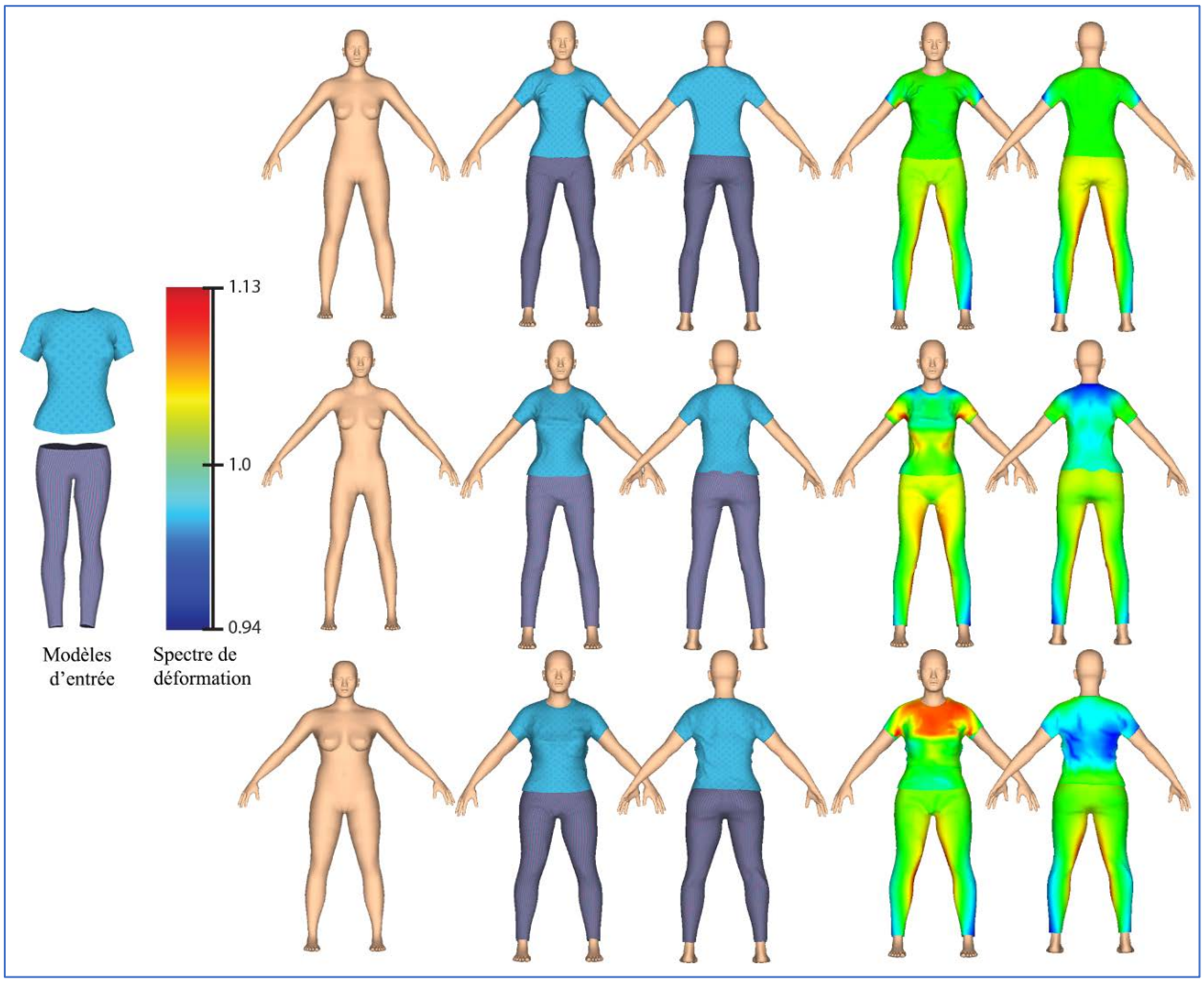


Figure 3-7 : Ajustement de vêtements sur trois corps humains ayant des poids différents

La figure 3.8 illustre les résultats de positionnement de deux pièces de vêtements, sur sept modèles humains ayant une même posture et des tailles différentes. Le squelette est intégré automatiquement à l'aide du processus d'intégration, de sorte que toutes les étapes du processus soient effectuées sans aucune intervention manuelle. Les deux pièces de vêtements sont déformées avec succès à l'aide de la méthode de déformation HRBF. La surface des corps habillés est lisse, et tous les problèmes de pénétration (Figure 3.8) sont éliminés avec succès.

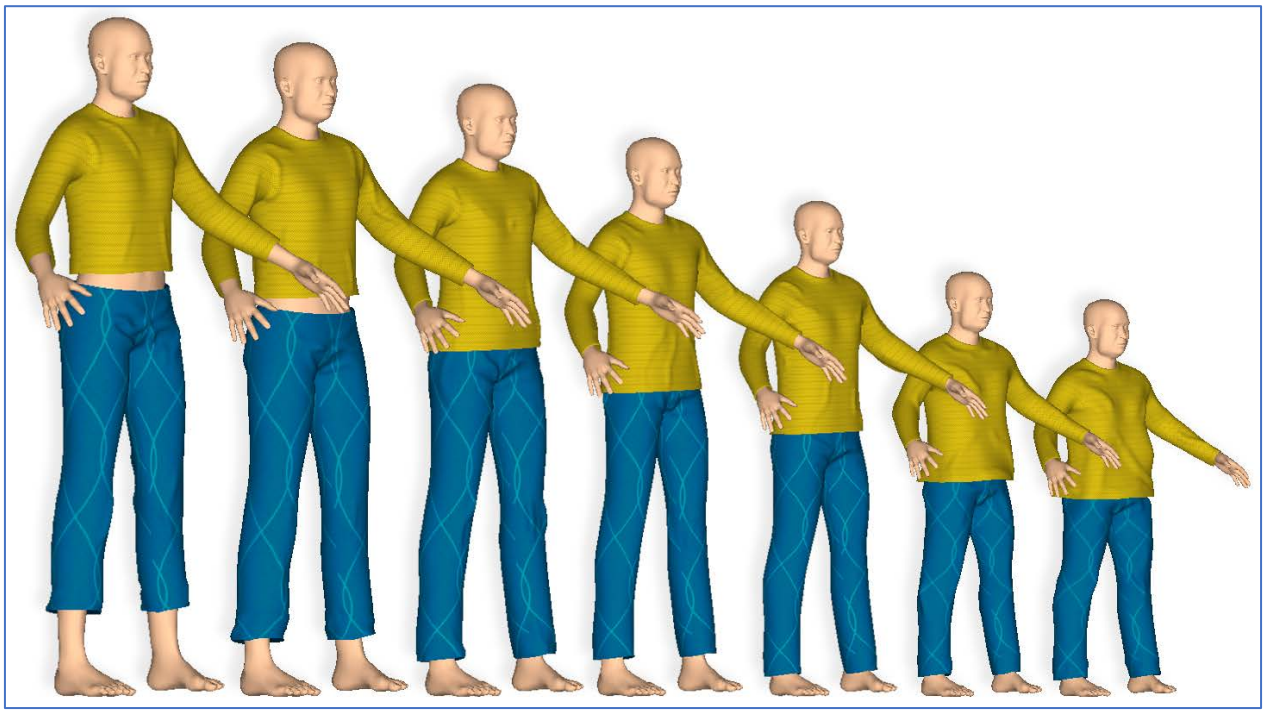


Figure 3-8 : Positionnement de deux modèles de vêtements sur sept corps humains ayant des tailles différentes

- **Habillage d'un même corps avec des vêtements différents**

La figure 3.9 montre les résultats d'habillage d'un même corps féminin, avec différents types de vêtements. D'après l'apparence visuelle, les modèles semblent être mieux transférés sur la surface du corps. Nous pouvons noter que le système de positionnement basé sur la déformation HRBF est mieux adapté aux vêtements avec une structure fermée du maillage.

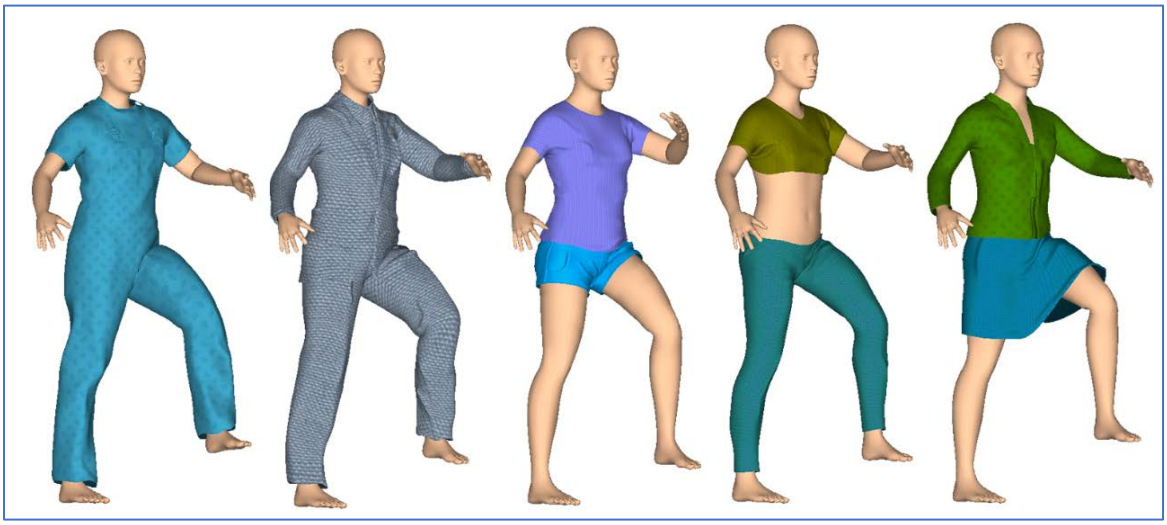


Figure 3-9 : Positionnement de différents types de vêtements sur un même corps

- **Habillage d'un corps en différentes postures**

Le système de positionnement que nous avons proposé permet d'habiller facilement un même corps sous différentes postures avec un même modèle de vêtements. Nous avons choisi six poses d'un modèle masculin de l'ensemble de données SMPL [98], et deux modèles de vêtements de la base de données Multi-garment Network [19]. Les modèles de vêtements sont transformés individuellement depuis une pose T vers les autres poses du corps (figure 3.10).

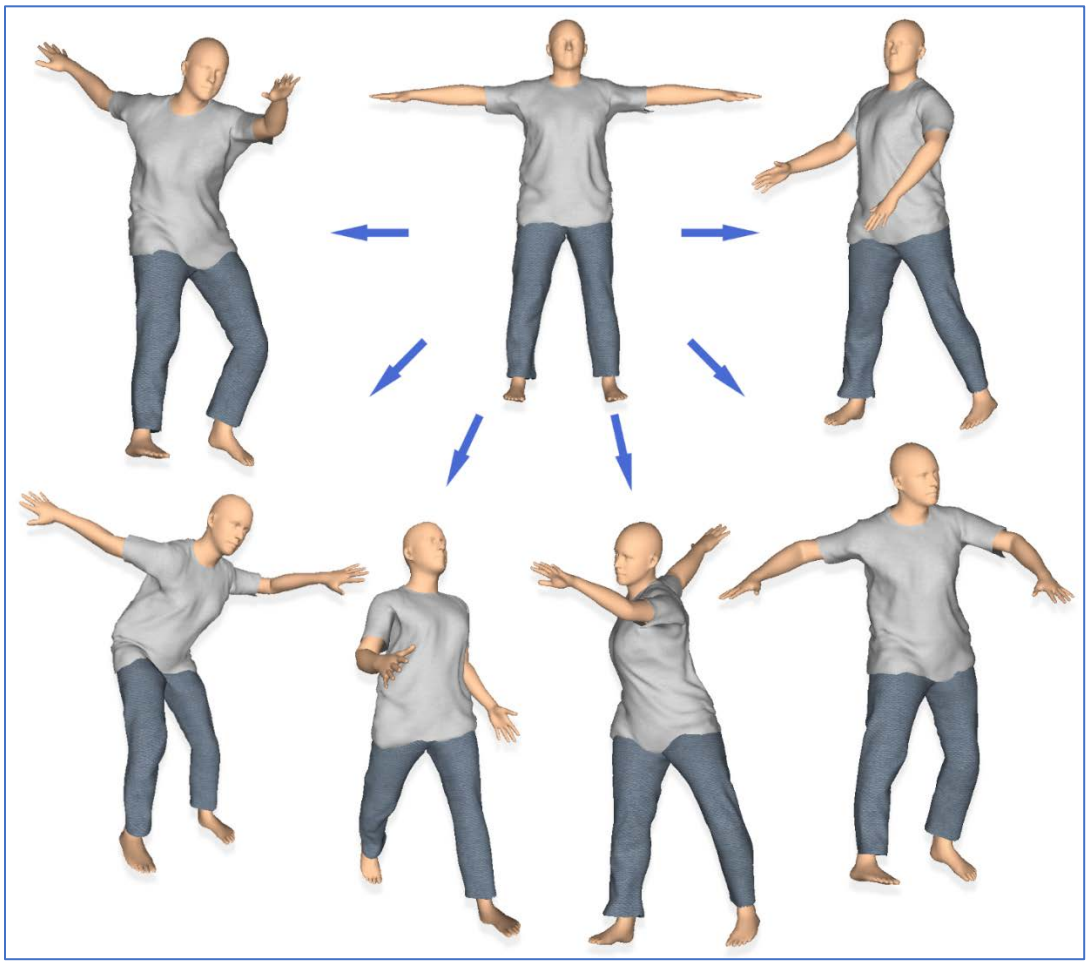


Figure 3-10 : Positionnement de vêtements sur un même corps en différentes postures

Comme le montre la figure 3.10, nous pouvons remarquer que la géométrie du vêtement transféré suit la posture et la forme du corps. Par conséquent, le système de positionnement basé sur la déformation HRBF permet de positionner un même vêtement à plusieurs reprises sur un corps en animation. De plus, la simulation préserve l'aspect intrinsèque des vêtements déformés qui reflète l'élasticité du vêtement.

Nous pouvons noter aussi que dans la simulation présentée sur la figure 3.10, les vêtements très serrés nécessitent un alignement précis de leurs squelettes avec celui du corps. Par exemple, dans le modèle de pantalon, toute déviation d'une articulation du genou pourrait provoquer trop de pénétrations entre les deux modèles. Par conséquent, tant que les squelettes des deux modèles se coïncident, les pénétrations sont facilement éliminées.

- **Différentes résolutions du vêtement**

La figure 3.11 présente les résultats de positionnement d'un même vêtement simulé en différentes résolutions sur un modèle humain.

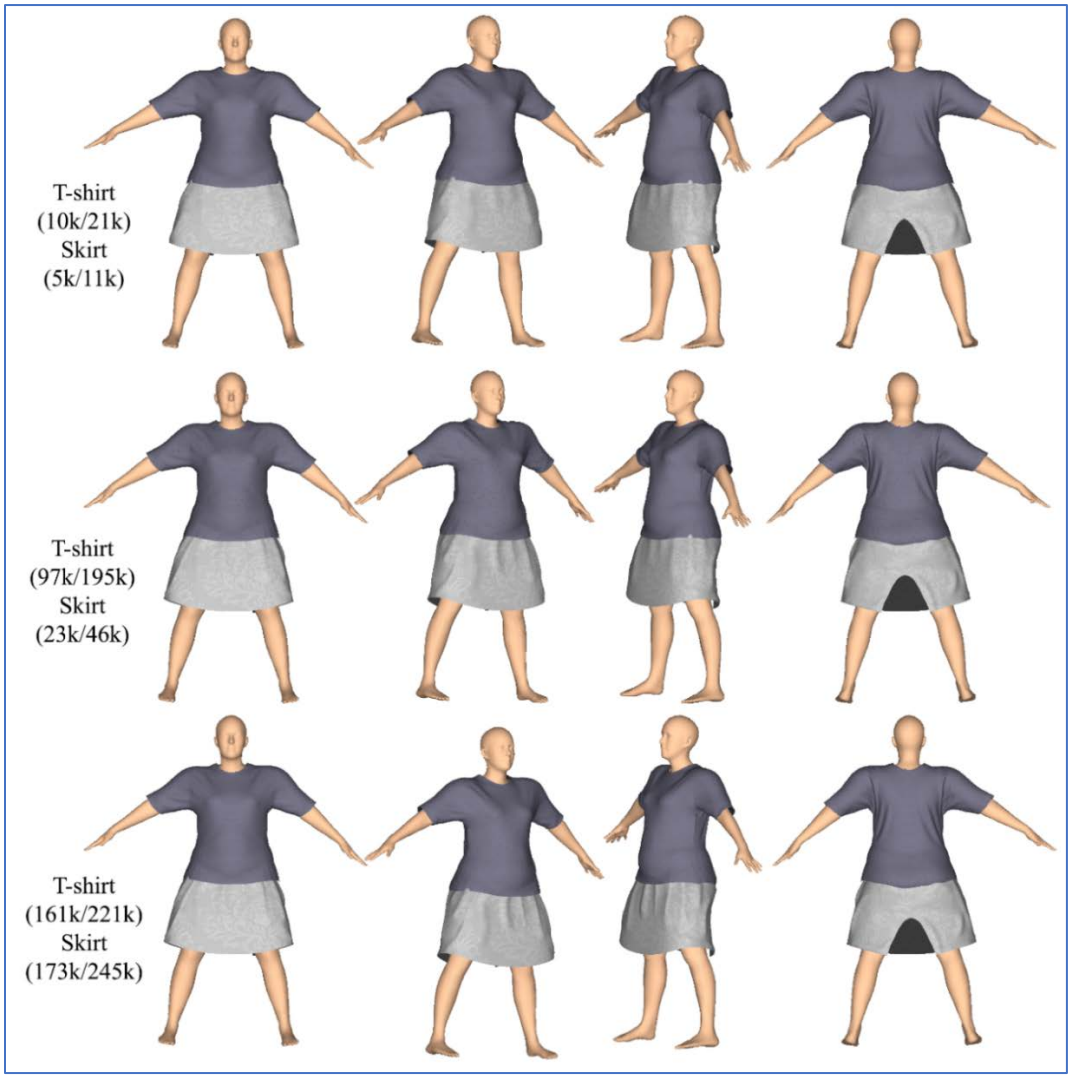


Figure 3-11 : Résultats de positionnement de deux modèles de vêtements ayant des résolutions différentes sur un même corps

D'après les résultats de cette simulation, le modèle à haute résolution apparaît plus naturel, ce qui est parfaitement visible aux extrémités inférieures de la jupe. Le résultat du modèle à basse résolution montre seulement un léger manque de détails sur la surface de vêtement. Nous pouvons noter que pour les vêtements à haute résolution, il est possible de simplifier la résolution d'une manière appropriée afin de réduire le temps d'exécution du processus de positionnement.

- **Habillage du corps humain scanné**

Afin de montrer l'efficacité des résultats de la méthode du positionnement en utilisant des caractères scannés, nous l'avons testé sur trois modèles de corps scannés issus de la base de données SCAPE [9]. Sur la figure 3.12, nous montrons le résultat du positionnement d'un modèle de t-shirt sur les trois corps scannés.

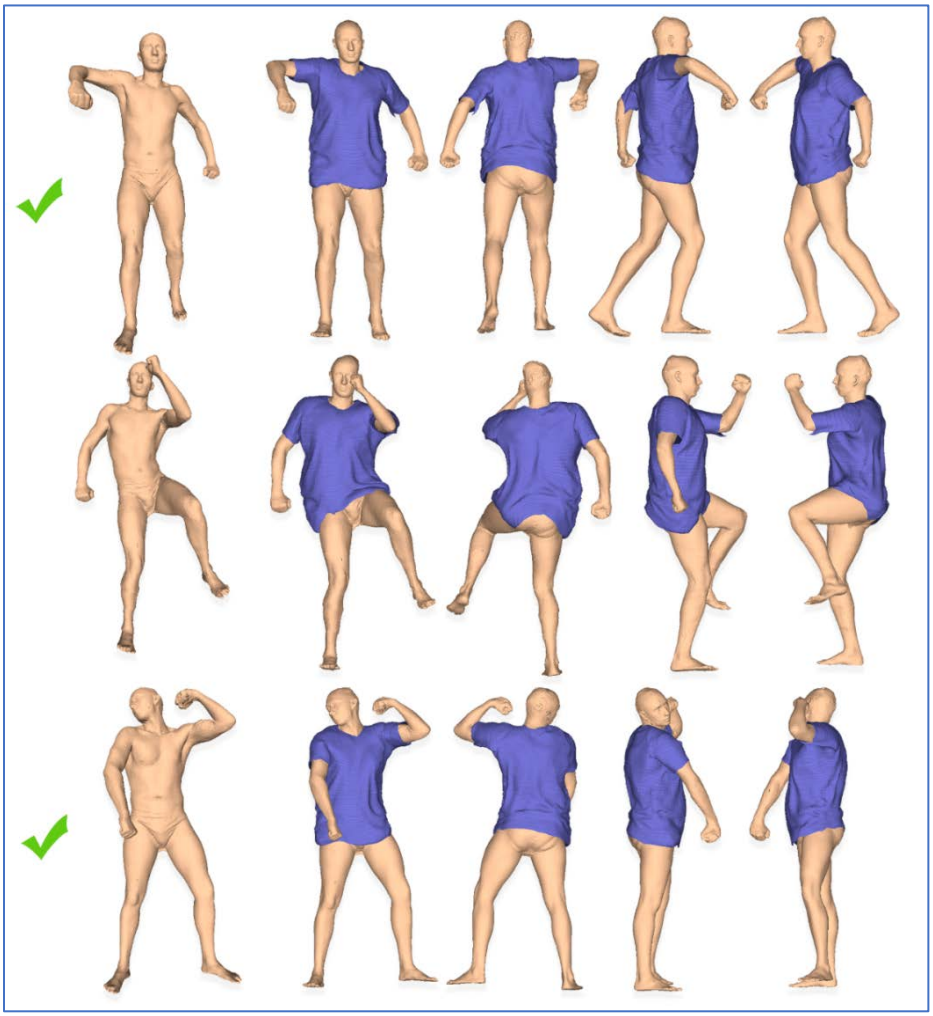


Figure 3-12 : Résultats de l'ajustement d'un modèle de t-shirt sur trois corps humains scannés différents issus de [9]

Comme nous remarquons, le système de positionnement a réussi à positionner le vêtement sur les corps de la première et la troisième ligne. Ces résultats sont dus à la structure des modèles du corps scannés, et à la complexité de leurs postures.

- **Transférer des vêtements de tailles différentes sur un même corps**

La figure 3.13 présente les résultats du transfert d'un modèle de chemise sous différentes échelles de taille sur un même modèle de corps dans une pose T. D'après les résultats visuels, le troisième modèle semble être le mieux adapté au corps.

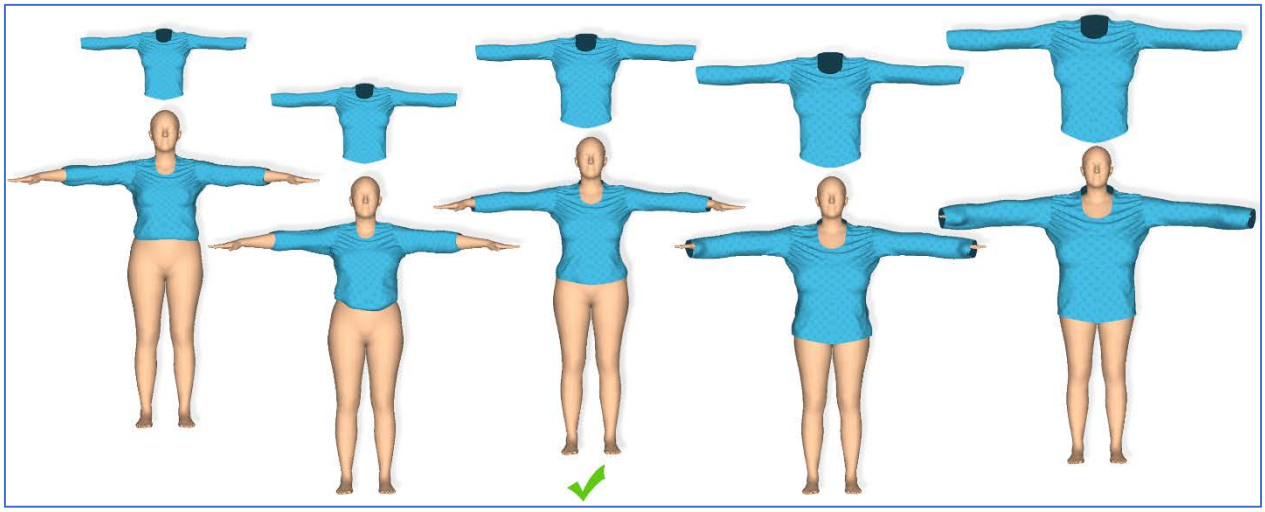


Figure 3-13 : Résultats du transfert de quatre modèles de chemises ayant une taille différente sur un même corps

3.6.2. Comparaison avec les approches alternatives

- **Comparaison avec les méthodes d'ajustement récentes**

Nous avons effectué une comparaison de la méthode positionnement proposée avec les travaux connexes récemment publiés. Cette comparaison présentée dans les tableaux 3.1 et 3.2, a été mené suivant six critères :

1. Les exigences d'entrée du système ;
2. La déformation de vêtements ;
3. Les postures de corps supportées ;
4. Les types de vêtements pris en charge ;
5. La gestion des pénétrations entre les modèles ;
6. La préservation des caractéristiques du maillage de vêtements.

Approches	Données d'entrée	Postures du corps	Types du vêtement
Li et al. 2010 [93]	– Modèle du vêtement. – Modèle du corps cible.	Différentes postures	Vêtements avec des surfaces à forme fermée
Li et al. 2013 [92]	– Modèle humain de référence portant le modèle de vêtements. – Modèle humain cible.	Différentes postures	Vêtements avec des surfaces à forme fermée
Pons-Moll et al. 2017 [113]	– Modèle humain de référence portant un vêtement (à partir d'un scanner 4D). – Modèle humain cible.	La pose du corps cible en cohérence avec la pose du corps de référence.	Vêtements avec des surfaces à forme fermée
Tisserand et al. 2017 [137]	– Modèle de vêtements. – Modèle du corps cible.	T-pose	Vêtements avec des surfaces à forme fermée
Wu et al. 2018 [146]	– Modèle de vêtements. – Modèle du corps cible.	Différentes postures	Différents types
Jiang et al. 2019 [69]	– Modèle humain de référence portant le modèle de vêtements. – Modèle humain cible.	Différentes postures	Différents types
Shi et al. 2020 [128]	– Image complète du corps habillé. – Modèles de vêtements 3D. – Modèle humain cible.	Différentes postures	Différents types
Notre méthode	– Modèle de vêtements. – Modèle du corps cible.	Différentes postures	Vêtements avec des surfaces à forme fermée

Tableau 3-1 : Comparaison avec des méthodes alternatives au niveau de données d'entrée ; posture du corps et type de vêtement

Le système que nous avons proposé nécessite des modèles d'entrée qui sont faciles à trouver. Cependant, d'autres méthodes d'ajustement de vêtements [157, 137, 146, 113] nécessitent en plus un modèle humain de référence. La plupart des approches présentées dans ce tableau, à l'exception de [69], s'intéressent à la facilité de manipulation du processus d'adaptation, plutôt qu'à la préservation des caractéristiques du vêtement.

Approches	**Déformation de vêtements**	**Gestion des pénétrations**	**Préservation des caractéristiques**
Li et al. 2010 [93]	Paramétrage volumétrique	Manquant	Non assurée
Li et al. 2013 [92]	Paramétrage volumétrique	Manquant	Non assurée
Pons-Moll et al. 2017 [113]	Dépouillé au modèle humain	Manquant	Non assurée
Tisserand et al. 2017 [137]	Dépouillé au modèle humain	Manquant	Non assurée
Wu et al. 2018 [146]	Dépouillé au modèle humain	Utilise des algorithmes de gestion des collisions	Non assurée
Jiang et al. 2019 [69]	Manquant	Les collisions vêtement/ vêtement et corps/ vêtement sont toutes les deux traitées.	Assurée
Shi et al. 2020 [128]	Manquant	Manquant	Non assurée
Notre méthode	Déformé par squelette avec le suivi des sommets par l'approximation HRBF	Les collisions vêtement/ vêtement sont traitées à l'aide de l'étape de suivi HRBF, et les collisions corps/vêtement sont traitées à l'aide du processus de gestion des pénétrations (paragraphe 3.5.2).	Assurée

Tableau 3-2 : Comparaison avec des méthodes alternatives au niveau de déformation, gestion des pénétrations et préservation de caractéristiques du vêtement

Bien que notre méthode soit distinguée par l'étape de déformation du vêtement, elle est similaire avec les autres méthodes de positionnement dans l'étape de transfert du vêtement. Nous avons effectué une comparaison avec des méthodes alternatives [128, 137, 146] au niveau de la complexité de l'étape de transfert.

La méthode proposée par Tisserand et al. [137] effectue une étape d'optimisation globale afin de minimiser la métrique d'erreur dans l'étape de transfert du vêtement. La complexité de cette optimisation est $O\left(k.N_h.N_g\right)$, où N_h le nombre de sommets du modèle humain, N_g le nombre de sommets du vêtement et k est le nombre d'itérations de l'optimisation. Wu et al. [146] ont proposé une étape d'optimisation plus rapide avec une complexité de $O\left(k.N_g\right)$. Shi et al. [128] proposent un ajustement du vêtement basé sur la déformation par squelette avec une complexité de $O\left(N_h.\log N_h\right)$. En revanche, notre méthode ne nécessite aucune étape d'optimisation. En effet dans le cas de la déformation basée sur l'approximation HRBF, la complexité de l'étape de transfert du vêtement vers le corps est $O\left(N_g.\log N_h\right)$. Dans la plupart des cas, le nombre de sommets du maillage du vêtement est inférieur à celui du maillage du corps ; par conséquent, le transfert du vêtement permet d'économiser un temps de calcul important.

- **Comparaison avec les méthodes basées sur la déformation par squelette**

Bien que certaines approches récemment proposées [93, 92, 146, 128] présentent de nombreuses étapes détaillées, il leur manque toujours des détails de mise en œuvre spécifiques dans certaines étapes, ce qui rend la reproduction de leurs résultats difficile. Par conséquent, nous limitons cette comparaison aux étapes importantes et similaires avec les autres approches basées sur la déformation par squelette [93, 146]. La méthode de positionnement que nous avons proposée diffère de ces méthodes en termes d'étape de suivi de la déformation par l'approximation HRBF. Dans le cas de la proposition de [93], les auteurs utilisent un maillage tétraédrique pour déformer le modèle de tissu. Cette approche présente un problème pour le cas où deux parties différentes du maillage du vêtement sont proches en distance géométrique, et éloignées en distance géodésique. En effet, des déformations irréalistes peuvent se produire dans ce cas, par exemple, dans la région de l'aisselle (figure 3.14 (a)). En revanche, notre méthode permet de surmonter ce type de problème à l'aide de l'approximation HRBF du maillage (figure 3.14 (b)).

Le travail de Wu et al. [146] utilise la méthode de Baran et al. [16] pour générer le squelette et les poids de dépouillement. Cependant, cela nécessite que le modèle d'entrée soit un *"manifold"*, et de nombreuses interventions de l'utilisateur sont indispensables. En revanche, le système d'incorporation de squelette proposé a prouvé son succès dans la plupart des cas, sauf pour certains maillages complexes qui nécessitent une manipulation manuelle.

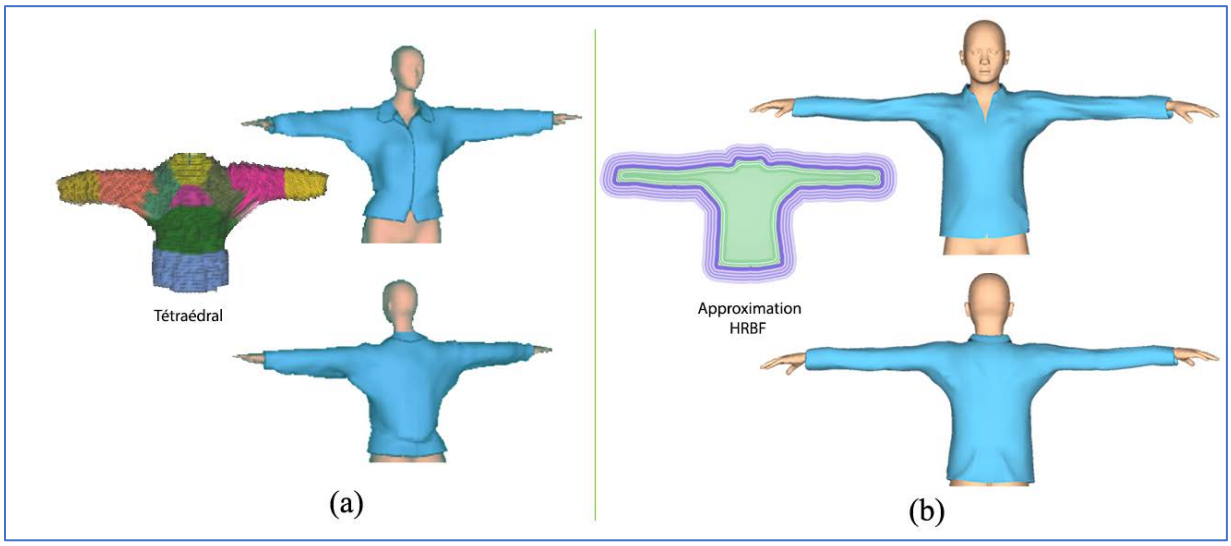


Figure 3-14 : Comparaison des résultats de la déformation du vêtement en utilisant le tétraédral de proposition de [93] (a) ; et l'approximation HRBF (b)

- **Comparaison avec les méthodes basée sur l'enrobage (skinning).**

Bien que notre approche entre dans la catégorie des approches qui utilisent l'enrobage DQS pour déformer le maillage du vêtement, elle se distingue par l'utilisation de l'étape de correction des positions des sommets effectuée après une déformation standard. Cela permet d'éviter deux problèmes majeurs causés par le dépouillement standard, à savoir : l'auto-pénétration du vêtement et la déformation élastique extrême. Nous avons effectué la comparaison avec la méthode de Guan et al [55]. Comme le montre la figure 3.15, la transformation du corps amène le vêtement transformé dans un état fortement déformé. Cela pose un problème, car il n'est pas facile de résoudre les problèmes d'auto collisions dans ce cas.

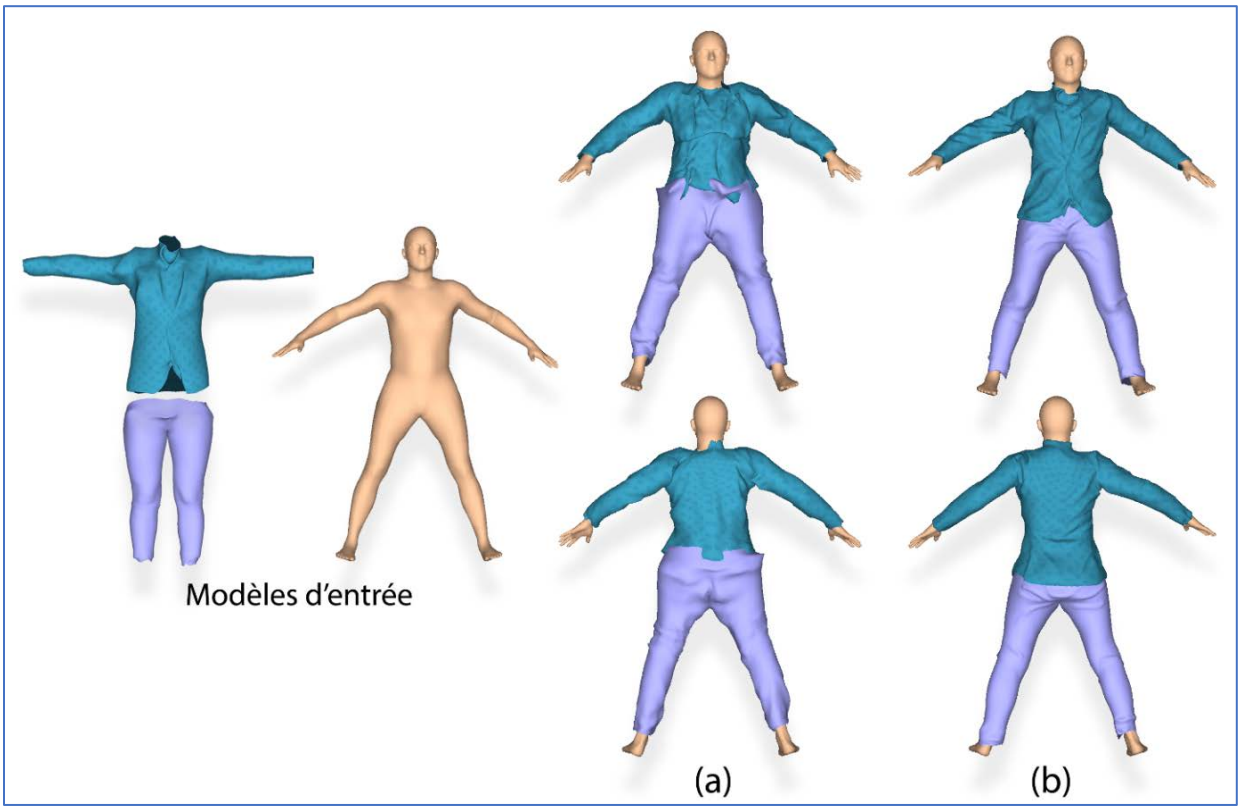


Figure 3-15 : Comparaison en termes de traitement des auto collisions entre la méthode standard basée sur l'enrobage [55] (a) et nos résultats (b)

3.7. Performances d'exécution

Nos simulations ont été réalisées sur un PC équipé d'un processeur Intel i7-4720HQ à 2,60 GHz, avec 16 Go de RAM et une carte graphique Geforce 480 GTX. Le tableau 3.3 présente les statistiques de temps d'exécution pour certains exemples. Pour chaque modèle, les statistiques présentées dans ce tableau sont classées comme suit :

1. Nombre de sommets et de faces du vêtement ;
2. Nombre de sommets et de faces du corps ;
3. Le temps d'exécution de l'étape d'intégration de squelette pour le vêtement ;
4. Le temps d'exécution de la déformation du vêtement ;
5. Le temps d'exécution de calibrage, qui concerne le changement des dimensions du vêtement si nécessaire ;
6. Le temps d'exécution des étapes de transfert du vêtement vers le corps.

Comme nous pouvons constater, l'étape de l'intégration du squelette et l'étape de transfert du vêtement qui inclut le traitement des pénétrations, sont généralement les étapes qui nécessitent

plus de temps de calcul. Afin d'optimiser le coût de l'étape de traitement des pénétrations, nous utilisons le résolveur de démêlage proposé par Ye el al. [152] pour les pénétrations initiales et les collisions éventuelles entre le tissu et le corps après la déformation du vêtement.

Modèle	Vêtement (sommets/faces)	Corps (sommets/faces)	Intégration du squelette (s)	Déformation (s)	Calibrage (s)	Transfert du vêtement (s)	Total (s)
Chemise (Figure 3.7 1er ligne)	5148/10096	13380/26756	5.357	0.850	0.090	2.321	8.61
Pantalon (Figure 3.7 1er ligne)	3485/6848	13380/26756	4.421	0.641	0.130	5.019	10.21
T-shirt (Figure 3.9)	1311/2514	11452/19254	3.273	0.332	0.115	4.012	7.73
Pantalon (Figure 3.10)	9998/19849	6890/13776	4.984	1.418	Non effectué	3.207	9.60
Jupe (Figure 3.11 2eme ligne)	23544/46592	6890/13776	4.114	3.160	Non effectué	12.661	19.93
Chemise (Figure 3.12 1er ligne)	7702/15180	12500/24999	5.625	0.713	Non effectué	9.124	15.46

Tableau 3-3 : statistiques de temps d'exécution (en seconde) pour certaines simulations présentées dans le présent chapitre

Le traitement de la pénétration est lié généralement au nombre de sommets du vêtement qui pénètrent le corps humain. Par exemple, la pénétration pour un modèle de pantalon sur la figure 3.10 prend moins de temps de calcul que le cas du pantalon sur la figure 3.7. Ceci est dû au fait qu'une forme du maillage plus large permet relativement d'éviter trop de pénétration. Dans le cas de modèle sur la figure 3.12, la manipulation des pénétrations prend plus de temps à cause de la forme du modèle humain scanné qui peut générer plus de collisions avec le vêtement.

Nous pouvons noter que le temps de calcul de la déformation du vêtement est indépendant de la posture du modèle humain ; en effet, le temps que nécessite la déformation des modèles présentés sur la figure 3.11, est proportionnellement le même pour toutes les poses du corps. Pratiquement,

le temps d'exécution de la déformation du vêtement est principalement lié à l'étape d'approximation HRBF. La forme du vêtement et le nombre d'os utilisés dans l'étape de partitionnement sont les principaux facteurs affectant la création des champs potentiels HRBF. Nous avons utilisé le parallélisme GPU afin d'optimiser les étapes de déformation du vêtement (chapitre 2), à savoir, le déploiement en DQS, la projection des sommets, la relaxation tangentielle.

3.8. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté une méthode pratique pour positionner un vêtement donné sur un modèle humain 3D ayant diverses postures et formes sans utiliser un modèle humain de référence. Ce système de positionnement établit la correspondance entre les modèles humains et les modèles de vêtements sans informations prédéfinies. L'idée de base est d'utiliser la déformation par squelette pour assurer un bon alignement entre le vêtement et le corps cible par l'habillage. En se basant sur la différence structurelle entre le squelette du corps et le squelette du vêtement, nous ajustons la posture du vêtement avec celle du corps, ce processus est effectué en utilisant la méthode de déformation basée sur les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF). Après la déformation du vêtement, il est possible de le positionner automatiquement autour du corps humain. Ensuite, nous effectuons un traitement des collisions sur le modèle résultant afin de résoudre les interpénétrations potentielles entre le corps et le vêtement. Selon les résultats présentés dans le présent chapitre, notre approche génère des résultats plausibles et son application dans les logiciels de modélisation est très possible.

Chapitre 4

Nouvelle méthode de déformation à base des formes volumétriques (DBVS) - Application au maillage de main virtuelle

4.1. Introduction

Le besoin du personnage virtuel animé est devenu important dans les scènes virtuelles telles que les jeux vidéo ou les productions de film d'animation. Il est fréquent d'avoir besoin de définir des personnages plausibles, dont l'animation obéit aux aspects d'une déformation réelle. Un corps humain virtuel est principalement constitué de diverses parties, qui se distinguent par leur difficulté de manipulation. La main virtuelle est parmi les membres difficiles à manipuler lors de l'animation. Généralement, la simulation d'une main virtuelle dans les productions graphiques, essaye d'imiter la structure de la main réelle, qui est un chef-d'œuvre de complexité mécanique. Concevoir un modèle 3D de la main humaine, qui reflète la dynamique d'une main réelle, nécessite beaucoup de détails anatomiques. Il est donc nécessaire d'effectuer la déformation d'un tel modèle de main virtuelle par des méthodes de déformation procédurale, qui soient à la fois plausibles, contrôlable, et suffisamment rapide.

En mécanique, la déformation est exprimée comme la réponse d'un objet aux forces auxquelles il est soumis. Ainsi, l'évolution spatiale et temporelle de la forme s'exprime comme une solution intégrée à une équation à dérivées partielles. L'intégration de ces équations est désignée par simulation physique [86]. Cependant, il est généralement difficile de contrôler le résultat final de cette simulation. Il existe plusieurs méthodes alternatives aux méthodes physiques, pour déformer des objets 3D [49] ou des tissus virtuels [1], de manière simple et contrôlable.

L'enrobage (*skinning*) est l'une des approches les plus utilisées dans le milieu professionnel pour la déformation et l'animation d'objets attachés à un squelette (chapitre 1 paragraphe 1.4.3). Elle permet à la fois de manipuler intuitivement le squelette et d'assurer en quelque sorte un calcul rapide. Cependant, ce type de méthode présente un problème majeur : une déformation irréaliste due à une remarquable perte de volume local lors de l'application d'une rotation importante des

articulations. Les artistes sont ainsi obligés de mettre en place des outils alternatifs pour surmonter cette perte de volume. Ils doivent aussi avoir une expertise technique afin de déterminer si la perte est due principalement à la méthode, ou si celle-ci peut être évitée par une manipulation simple des poids d'enrobage.

Dans la déformation par squelette, la surface du maillage est attachée à un ensemble d'os interconnectés [101]. En transformant le squelette en différentes poses, l'utilisateur est capable de déformer un maillage intuitivement. Chaque sommet du maillage est associé à un ou plusieurs os, selon les poids d'influence définis auparavant. Les méthodes standard comme l'enrobage par fusion linéaire (LBS) [55] et l'enrobage en *"Dual quaternion"* (DQS) [75], combinent des transformations osseuses rigides pour mettre à jour la position des sommets. Ainsi, les positions des sommets sont indépendantes les unes des autres. Bien que ce principe d'indépendance permet une implémentation temps réel de ces algorithmes, la forme globale de l'objet peut être affectée. Ce qui entraîne ensuite des déformations irréalistes. De nombreuses solutions ont été proposées impliquant différentes stratégies d'interpolation et représentations du maillage [138].

Dans le présent chapitre, nous allons présenter notre troisième contribution dans le contexte d'animation des caractères articulés associés à un squelette. Nous avons choisi le cas d'une main virtuelle avec squelette. Cette contribution a pour objectif de surmonter les défauts de l'enrobage standard (LBS et DQS), en ajoutant une étape de post-traitement qui consiste à corriger les positions des sommets du maillage déformé. La correction des positions est effectuée à l'aide de formes volumétriques qui sont considérées comme guides de déformation des articulations.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit : le paragraphe 4.2 expose le principe de calcul du poids d'enrobage utilisé dans la méthode proposée. Dans le paragraphe 4.3, nous présentons un aperçu général de la méthode de DBVS. Le paragraphe 4.4 expose les différentes étapes de la déformation du maillage à l'aide des formes volumétriques. Dans le paragraphe 4.5, nous présentons les résultats d'application de DBVS sur un maillage de main humaine. Le paragraphe 4.6 présente les performances en temps d'exécution de la méthode DBVS. Dans le paragraphe 4.7 nous montrons les possibilités du contrôle utilisateur de la déformation DBVS. Le paragraphe 4.8 présente les résultats de comparaisons avec certaines méthodes de déformation alternatives.

4.2. Calcul du poids d'enrobage

La déformation par enrobage classique demande trois données d'entrée : un maillage représentant l'objet, une structure qui représente le squelette d'animation, et les poids d'enrobage représentant l'influence des transformations des os du squelette par rapport aux positions des sommets du maillage.

Généralement, les maillages d'entrée sont construits par un artiste ou issus de données numérisées par des scanners 3D dans le cas d'objets réels. Quant au squelette d'animation, il est aisément modélisable en utilisant des outils professionnels de modélisation 3D tels que Blender [20], 3DS Max [7]. Dans le cas d'une main virtuelle, des méthodes automatiques de génération de squelettes similaires à la structure d'un squelette anatomique peuvent être employées comme dans la proposition de [12]. Enfin, la définition des poids d'enrobage demande une expertise plus particulière, par ce que leur manipulation est moins intuitive. Les méthodes classiques utilisées pour définir des poids (chapitre 1 paragraphe 1.4.3) montrent qu'il n'existe pas de méthodes fiables qui permettent une définition de manière automatique, et qui soient rapides et applicables pour toute forme de modèle.

Quoique les outils de type pinceaux disponibles dans les logiciels de modélisation permettent à l'artiste d'apporter manuellement les corrections de poids indispensables, nous pensons qu'une correction automatique adéquate de poids d'enrobage en tant que post-traitement permet d'éviter ce travail manuel fastidieux.

4.3. Principe général de la méthode DBVS

Dans ce paragraphe, nous présentons une nouvelle méthode implicite pour déformer la main virtuelle en utilisant des formes volumétriques générées avec des primitives sphériques. La nouvelle méthode de déformation basée sur des formes volumétriques (*DBVS : deformation based on volumetric shapes*) est utilisée comme étape de post-traitement après une déformation standard (avec LBS ou DQS). Son principe consiste à enregistrer la distance initiale des sommets du maillage par rapport à une forme volumétrique, puis de ramener les sommets à leurs positions initiales, ceci après avoir appliqué la transformation (LBS ou DQS) nécessaire en parallèle sur le maillage de l'objet et la forme volumétrique.

Comme étape de correction de la déformation, la méthode de déformation à base de formes volumétriques peut être intégré facilement dans le pipeline des outils de déformation professionnelle. Nous pouvons résumer les principales contributions de cette proposition comme suit :

- **Qualité de la déformation**. La distance des sommets par rapport à la forme volumétrique est considérée comme une contrainte qui permet d'empêcher la perte de volume local au niveau d'articulation ainsi que l'effet d'emballage de bonbons causé par la méthode LBS. Elle réduit également l'artefact d'auto-intersections causé par la méthode DQS.

- **Compatibilité descendante**. Les données d'entrée requises sont similaires aux autres méthodes d'enrobage par squelette : une pose initiale du maillage, définition des poids d'enrobage et la transformation appliquée au squelette.

- **Performance.** Comme nous allons le voir par la suite, la méthode proposée est facile à implémenter et les résultats de simulation sont satisfaisants. En plus, la correction automatique des surfaces de contact au niveau des articulations (sans avoir recours à la gestion de collision) réduit le coût de simulation en temps d'exécution et en mémoire.

Un aperçu général de la méthode de DBVS est illustré sur la figure 4.1. Nous utilisons comme données d'entrée un maillage de main associé à un squelette d'animation. Puis, nous définissons l'influence des poids associés à chaque os du squelette à l'aide de l'outil de pondération du logiciel Blender [20]. Ensuite, nous segmentons le maillage de la main en morceaux suivant la distribution d'influence de chaque os du squelette sur le maillage.

Notre idée de base est d'ajuster les positions des sommets calculés à l'aide des méthodes d'enrobage standard. Pour bien suivre les déformations du maillage de la main, nous définissons des primitives sphériques associées aux articulations. À partir de ces primitives, nous construisons un modèle volumétrique en utilisant l'algorithme d'approximation proposé par Thiery et al. [135].

Au fur et à mesure de la segmentation du maillage, nous générons un modèle volumétrique par morceaux M_e. En utilisant cette configuration, chaque sommet du maillage stocke sa distance

initiale $d_{init}(v)$ par rapport à M_e. Cette distance est calculée à l'aide de fonctions de distance signée. Ensuite, les valeurs de cette distance sont reparamétrées pour approcher chaque partie du maillage manuel avec l'iso-surface 0.5 d'un champ potentiel $g:\mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$. Cela nous permet d'encoder les détails du maillage autour de l'iso-surface 0.5 du champ de potentiel g. Ensuite, nous définissons une seule fonction potentielle g en utilisant un opérateur de mélange basé sur le gradient comme dans la proposition de [54]. L'iso-surface 0.5 de g permet la correction de la déformation de la peau lors de l'animation.

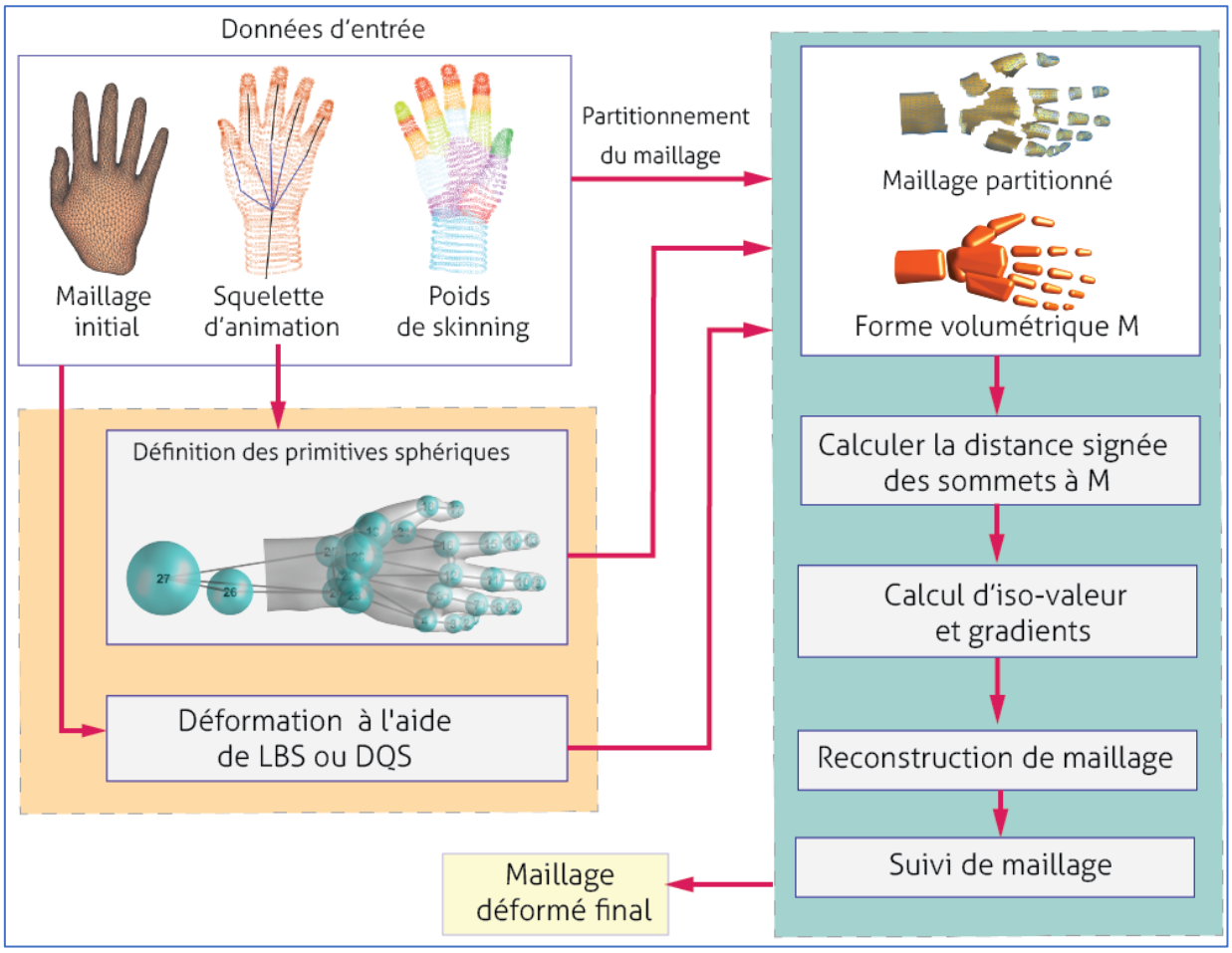


Figure 4-1 : Principe général de la méthode de déformation basée sur des formes volumétriques

Nous appliquons simultanément une transformation avec la méthode de DQS sur le maillage de la main et sur les parties du modèle volumétrique M_e. Plus précisément, nous appliquons la

même transformation d'un os sur sa partie associé dans M_e. À la fin, le suivi des positions des sommets est effectué après la transformation pour corriger les distorsions.

4.4. Déformation du maillage

La déformation avec la méthode DBVS est basée sur le fait que chaque sommet est déplacé pour atteindre sa distance d'origine par rapport à la forme volumétrique. Par conséquent, nous avons besoin d'un moyen efficace pour déterminer cette distance.

4.4.1. Création de la forme volumétrique

Pour approcher correctement les morceaux du maillage de la main, une forme volumétrique sera le bon choix. Le modèle que nous proposons dans cette approche est une variante d'une surface de convolution. Les éléments de base de ce modèle sont illustrés sur la figure 4.2. La surface est définie comme le niveau zéro de la fonction scalaire suivante :

$$\phi(x) = \min_{c \in E} H\left(x \middle| c, r(c)\right) \quad (4.1)$$

où E est le squelette de contrôle pour générer la forme volumétrique (figure 4.2), et H est la fonction implicite pour générer une sphère de centre c et de rayon r tel que :

$$H\left(x \middle| c, r(c)\right) = \|x - c\|^2 - r(c)^2 \quad (4.2)$$

Les centres des sphères recouvrent le squelette E, tandis que les rayons sont en fonction de la position du centre c, interpolée linéairement à partir des valeurs $r_e = r(c_e)$. L'équation 4.1 définit un modèle hybride, c'est une surface implicite, tandis que le squelette est une représentation explicite (c'est-à-dire un complexe simplicial).

Nous généralisons cette construction pour concevoir un modèle approprié pour représenter le maillage d'une main humaine. Le modèle est composé de deux primitives : nous appelons la première primitive une bi-sphère, qui est une coquille convexe de deux sphères. Cela peut être vu comme deux sphères séparées reliées par un cône tronqué. La seconde primitive est nécessaire pour représenter les parties planes de la main ; on l'appelle un tri-sphère, qui est une coquille convexe définie par trois sphères.

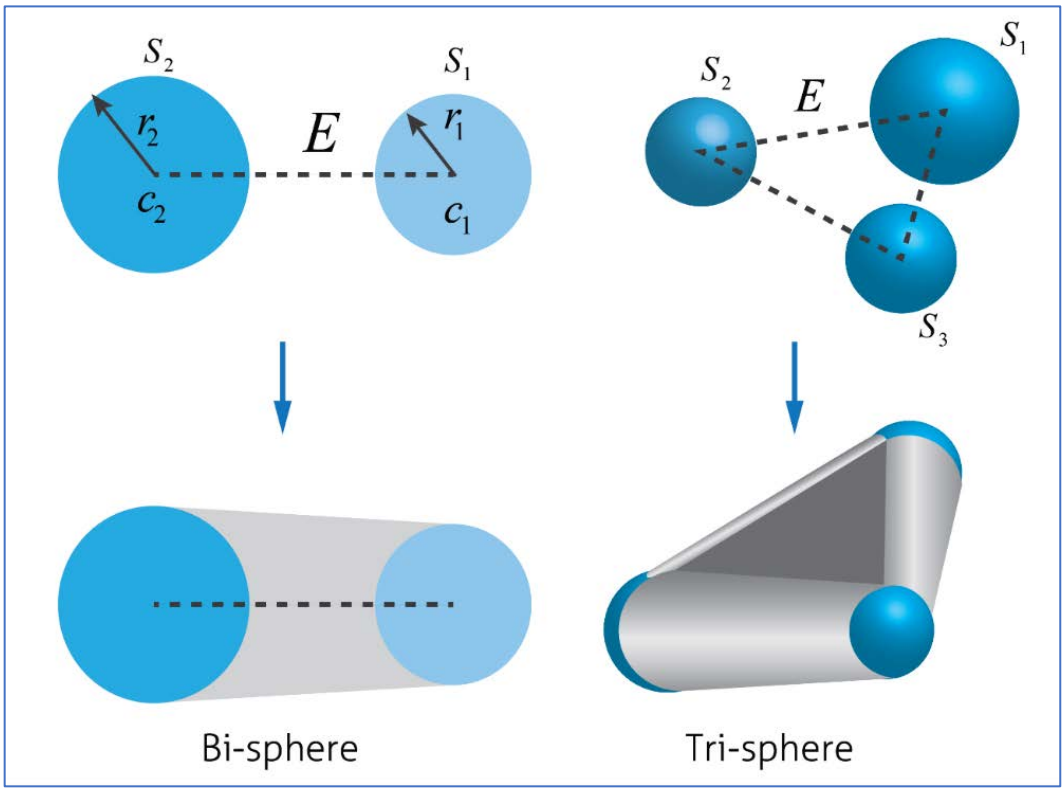


Figure 4-2 : Principe de construction des parties de la forme volumétrique

Notre algorithme exploite la structure de l'équation 4.1, en décomposant la surface en n éléments. Comme illustré sur la figure 4.2, les éléments sont classés comme primitives implicites sous forme de bi-sphère et tri-sphère, avec des fonctions implicites associées ϕ_e. Ainsi, pour un sommet v dans l'espace, la fonction implicite de la surface entière peut être définie par :

$$\phi_e(v) = \arg\min_{i=1..n} \phi_i(v) \quad (4.3)$$

La distance du sommet v par rapport à M_e est facilement calculée en interrogeant les distances aux éléments linéaires par morceaux du squelette E. Comme illustré sur la figure 4.3 (a), la distance d'un sommet v par rapport à sa partie du modèle associé est déterminée en recherchant le point le plus proche q du modèle par rapport au sommet v. Nous recherchons q dans le cas des modèles à deux et trois sphères comme illustrées sur la figure 4.3 (b).

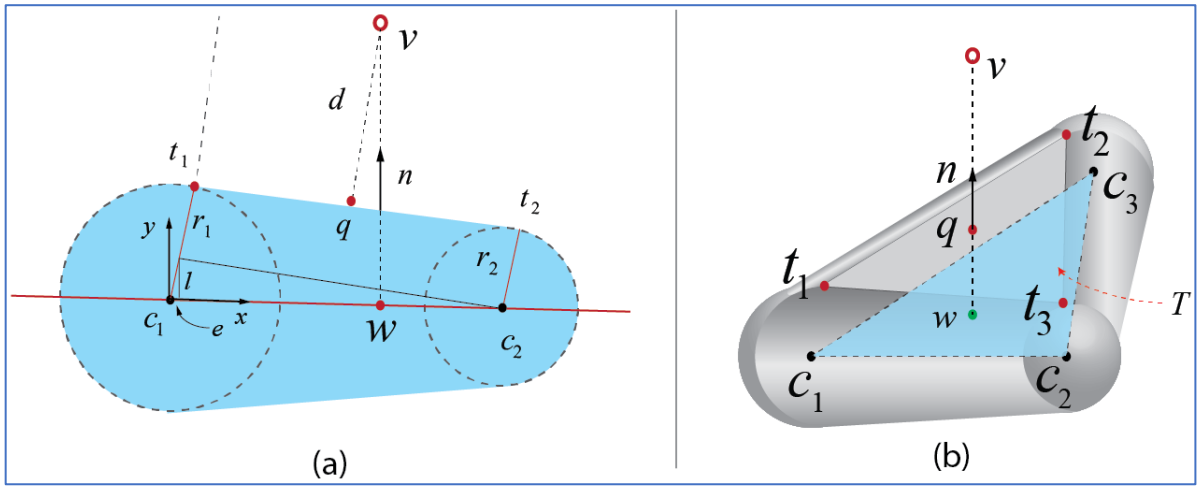


Figure 4-3 : Principe de calcul de la distance d'un sommet v par rapport à la forme volumétrique

4.4.1.1. Distance du sommet par rapport à une forme bi-sphère

Une forme bi-sphère est définie par deux sphères $S_1(c_1, r_1)$ et $S_2(c_2, r_2)$ (figure 4.3 (a)). Par construction, q est situé sur le plan défini par le triplet $\{c_1, c_2, v\}$ qui permet de résoudre le problème de correspondance en 2D. Nous avons défini le point w comme l'intersection du rayon (qui passe par v) avec le segment $[c_1 c_2]$. La position en coordonnées barycentriques de w est donnée par :

$$w = \beta c_1 + (1+\beta) c_2 \qquad (4.4)$$

Si $\beta \in [0,1]$, la position du point le plus proche est donnée par l'intersection de $[c_1 c_2]$ et r tel que $q = \Pi_L(v)$.

La distance d du sommet v par rapport à M est calculée à l'aide des dérivations suivantes, qui sont principalement des relations géométriques basées sur l'illustration sur la figure 4.3 ci-dessus

$$d(v) = \|v - w\| + \theta \|v - w\| \qquad (4.5)$$

avec $\theta = \dfrac{y}{\|c_2 - c_1\| - e}$, $y = \sqrt{(\|c_2 - c_1\| - e)e}$ et $e = \dfrac{(r_1 - r_2)^2}{\|c_2 - c_1\|}$.

Si $\beta < 0$ ou $\beta > 1$, alors le point le plus proche sera la projection de v sur S_1 ou S_2 respectivement, c'est-à-dire $q = \Pi_{S_1}(v)$ ou $q = \Pi_{S_2}(v)$. Dans ce cas, les formules sphériques peuvent être utilisées pour calculer la distance de v par rapport à M tel que :

$$d(v) = \|v - c\| - r \qquad (4.6)$$

4.4.1.2. Distance du sommet par rapport à une forme tri-sphère

Une tri-sphère est définie par trois sphères $S_i(c_i, r_i)$. La figure 4.3 (b) ci-dessus illustre la manière dont un élément plan peut être décomposé en trois parties : les éléments sphériques, coniques et planes associées aux sommets, des arêtes et des faces du modèle sphérique. Pour la partie plane $P(t_1, n)$ de normale n et la tangente t_1 par rapport à S_1, on calcule la projection oblique w en recherchant l'intersection du rayon r (qui passe par v) avec le triangle T formé par (c_1, c_2, c_3). En fonction de la position de w, nous avons deux solutions possibles :

- Si w appartient au triangle T, alors le point le plus proche sera la projection de v sur le plan P tel que : $q = P(v)$. Sinon, nous utilisons les coordonnées barycentriques de w dans le triangle T pour identifier le point le plus proche comme dans le cas de la bi-sphère. Encore une fois, nous pouvons utiliser les formules précédentes pour certains cas (équations 4.5 et 4.6).

- Si q est sur le triangle tangentiel, alors la distance et le gradient peuvent être calculés en utilisant la normale.

4.4.2. Support compact de la forme volumétrique

Bien que les fonctions de distance globale soient un moyen intuitif pour déterminer la distance entre deux points, elles présentent certains inconvénients en ce qui concerne la combinaison de plusieurs surfaces. Plus précisément, la localité n'est pas facilement définie. Un volume ne doit influencer que le voisinage proche et ne doit avoir aucun effet après une certaine distance. Par conséquent, nous avons besoin de fonctions avec un support compact, que nous appelons les fonctions de distance locales.

Les primitives à support compact sont souvent définies par la distance inverse par rapport à un point, segments, polygones, etc. (figure 4.4). Dans ce cas, la distance est égale à 1 au centre de la primitive et diminue progressivement jusqu'à ce qu'elle atteigne 0. La distance reste constante en dehors d'un rayon spécifié. Les primitives implicites à support compact sont conçues avec l'adoption des conventions suivantes :

- L'iso-surface $g(v)=0.5$ est la surface intéressante.
- Les valeurs $g(v)>0.5$ représentent l'intérieur de l'objet.
- Les valeurs $g(v)<0.5$ représentent l'extérieur de l'objet.

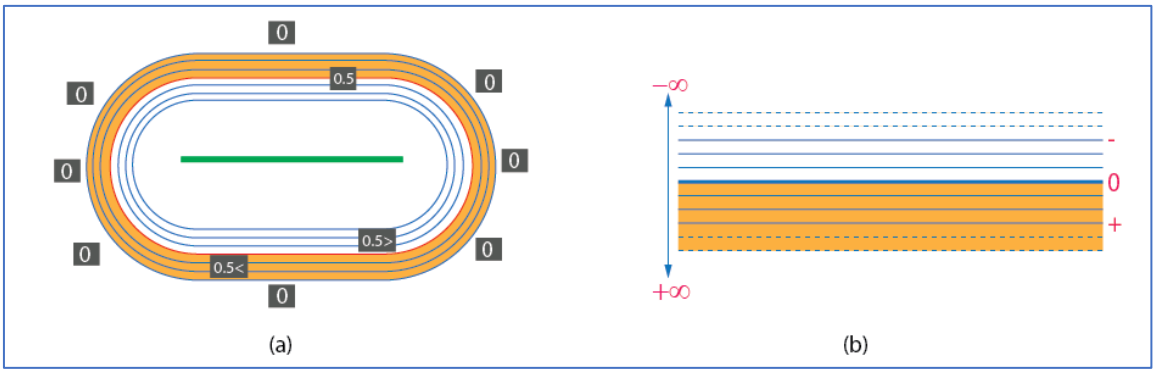


Figure 4-4 : Principe de support de surface implicite ; (a) primitive à support compact ; (b) primitive à support global

Pour concevoir le support compact adapté à la forme volumétrique, nous avons défini une nouvelle fonction $g(v)=t_R(d(v))$ telle que : $g(v)=1$ à l'intérieur et $g(v)=0$ à l'extérieur du maillage, avec une transition douce. La fonction g_r qui permet de fournir un support compact est définie par le re-paramétrage suivant :

$$t_R(d)=\begin{cases} 1 \quad si \quad d\le -R \\ 0 \quad si \quad d\ge R \\ I\left(\dfrac{d}{R}\right) \quad \text{sinon} \end{cases} \qquad (4.7)$$

avec $I(x)=-\frac{4}{16}x^5+\frac{5}{16}x^3-\frac{16}{15}x+1$ est une fonction d'interpolation et R est le seuil qui définit la taille du support compact de d.

Ceci convertit le support global d en une fonction potentielle g à support compact, tout en assurant la continuité au bord de son support. En pratique, nous voulons éviter des régions de l'espace où la valeur du potentiel est constante avec $g=1$ à l'intérieur de la surface. Une région avec des gradients nuls présentera un problème pour le déplacement des sommets (paragraphe 4.4.4). Pour cela, nous avons fixé R à le plus grand rayon des sphères utilisées dans la création du modèle volumétrique.

4.4.3. Composition des fonctions de distance

La principale force des surfaces implicites vient de leur simplicité pour être combinées ensemble dans une nouvelle forme. En effet, exprimer l'union, l'intersection ou la différence entre des surfaces implicites est extrêmement simple. La mise en œuvre d'une interface de modélisation booléenne devient facile avec cette représentation.

Par contre, il est connu que la combinaison de surfaces paramétriques (ou maillages) est sensiblement plus difficile à mettre en œuvre en raison des nombreux cas particuliers à gérer et des instabilités numériques. Dans la suite de ce paragraphe, nous décrivons le mécanisme de composition des parties de la forme volumétrique.

Une fois que les fonctions potentielles g sont calculées, nous les combinons pour définir un champ de potentiel G ajusté sur tout le maillage de la main afin de le déformer. Pour cela, nous appliquons une composition récursive en utilisant une composition par arbre CSG classique [Wyvill 1986]. Pour chaque paire de segments voisins (i, j), nous combinons les champs en un seul tel que : $G = k\left(g_i, g_j\right)$, avec k un opérateur de composition que nous allons détailler dans le paragraphe suivant.

4.4.3.1. Opérateur de composition

En informatique graphique, l'opérateur de composition le plus courant pour deux surfaces est l'opérateur union. En pratique, le maximum est mis en œuvre en utilisant la plus grande distance, car la singularité n'est numériquement jamais atteinte. Cependant, le mélange de deux surfaces implicites avec l'opérateur union peut provoquer un renflement indésirable de la peau. En plus, le mélange peut se produire même si les surfaces ne sont pas en contact. Dans notre cas, éviter ces

problèmes antérieurs est essentiel pour la crédibilité de la déformation. Pour cette raison, nous utilisons l'opérateur basé sur le gradient proposé par [54]. Cet opérateur est utilisé pour sa capacité à modéliser une surface de contact entre deux parties du maillage qui se croisent. La figure 4.5 illustre un exemple du processus de composition utilisant l'opérateur union et l'opérateur basé sur le gradient.

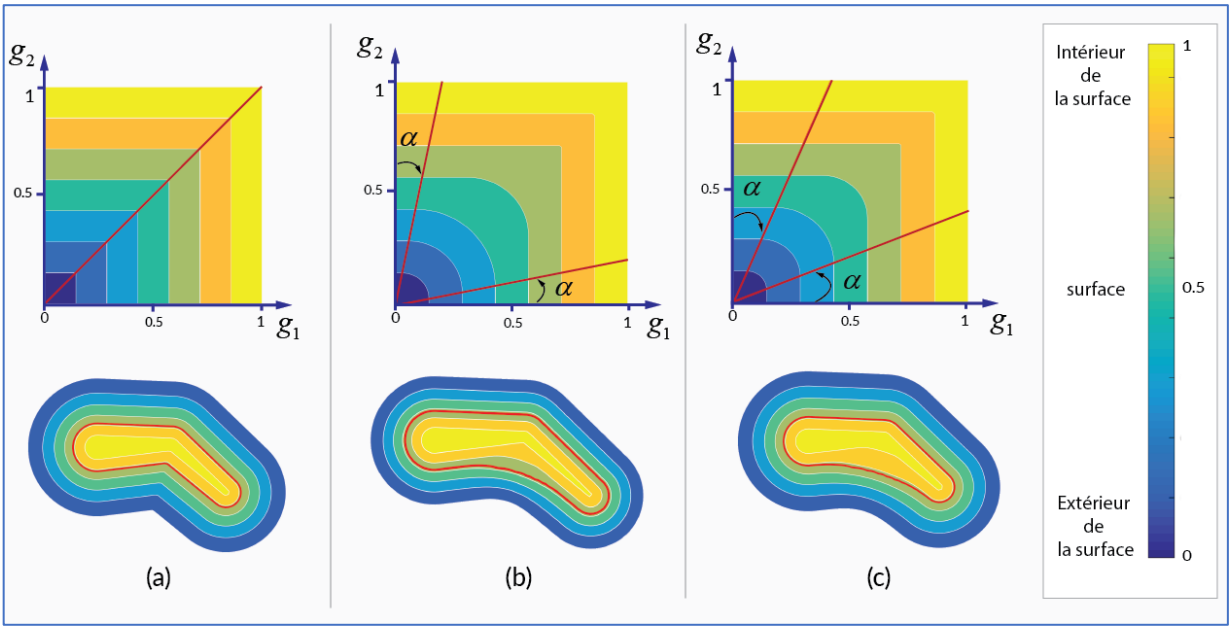


Figure 4-5 : Compositions effectuées à une paire de primitives implicites formant une articulation ; (a) avec l'opérateur d'union ; (b-c) mélange basé sur le gradient avec différentes valeurs de α

Pour chaque paire de segments du maillage voisins, soit g_1 et g_2 les fonctions de champ de l'approximation implicite à composer et k soit l'opérateur basé sur le gradient que nous utilisons dans la composition. La principale caractéristique du mélange basé sur le gradient est le paramètre θ utilisé pour contrôler la force de la composition. Ce paramètre est calculé en fonction de l'angle α entre les gradients de champ au point p, le champ G résultant du mélange est calculé comme suit :

$$G(p) = k(g_1, g_2, \theta) \qquad (4.8)$$

Le paramètre θ est calculé pour un point p en utilisant le "*mapping*" suivant :

$$\theta(\alpha)=\begin{cases}\theta_1 & si \quad \alpha \le \pi/8 \\ l_0(\alpha) & si \quad \alpha \in]\pi/8,\pi/2] \\ l_1(\alpha) & si \quad \alpha = \pi/2 \\ \theta_2 & si \quad \alpha > \pi/2\end{cases} \qquad (4.9)$$

avec θ_1 et θ_2 deux paramètres définis par l'utilisateur pour préciser les limites d'application d'union ou du mélange, $l_0(\alpha)=\sqrt{\left(e\left(1-\frac{4\alpha}{\pi}\right)\right)}+\frac{\pi}{10}$, $l_1(\alpha)=\left(e\left(\frac{4\alpha}{\pi}-1\right)\right)+\frac{\pi}{10}$ et $e(x)=1-\exp\left(1-\frac{1}{1-\exp(1+1/x)}\right)$.

Pratiquement, le paramétrage de l'équation 4.9 signifie que nous utilisons l'union pour des angles plus que $\pi/8$. Ensuite, le renflement augmente jusqu'à un maximum et il est conservé pour des angles plus élevés.

Nous notons que l'angle α peut être défini comme l'angle entre les os associé aux segments g_1 et g_2. Cependant, cette approche ne permet pas de distinguer les côtés externe et interne de l'articulation, comme le montre la figure 4.6 ci-après. Nous suivons une stratégie dont le but de lever l'ambiguïté entre les deux cas. Plus précisément, nous décrivons α comme étant l'angle entre les gradients de deux champs adjacents g_1 et g_2.

Cette méthode de mélange suppose que les champs sont colinéaires sur le côté extérieur des articulations, alors qu'ils sont séparés par un angle proche de α sur le côté intérieur. Malheureusement, comme nous pouvons le voir sur la figure 4.6, ce n'est pas vrai dans la plupart des scénarios, ce qui peut conduire à des artefacts. Pour résoudre ce problème, nous définissons le poids de mélange compris entre 0 et 1 pour chaque sommet, dans la pose initiale du maillage. La partie interne des doigts a des valeurs plus élevées pour produire des renflements, tandis que le reste de la main est nul pour avoir une union pure. Le calcul de ce coefficient est basé sur les coordonnées osseuses locales des sommets.

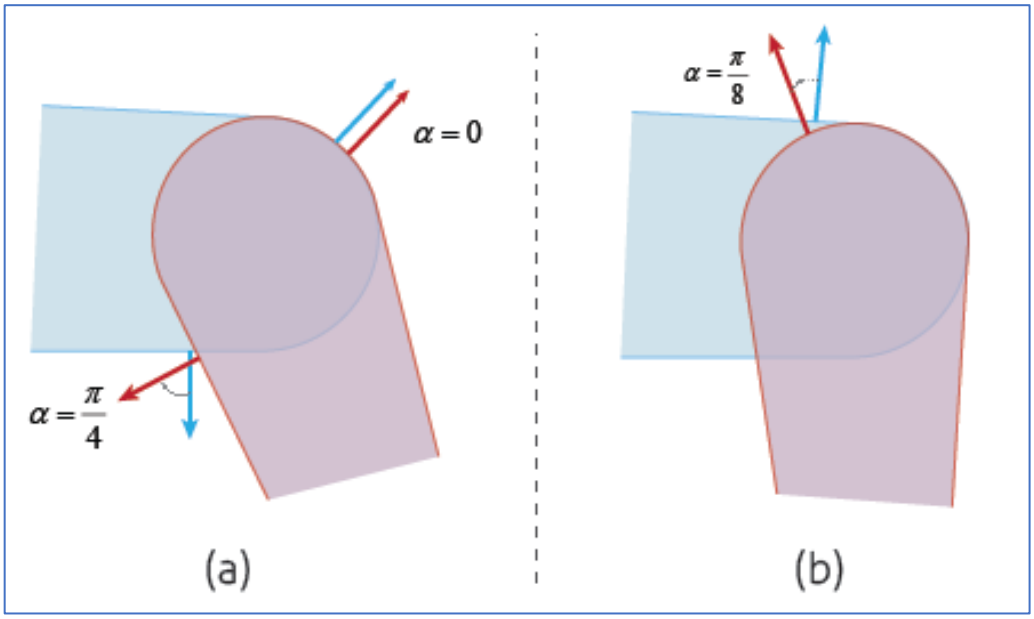


Figure 4-6 : Tracé des gradients de fonction de distance pour une articulation ; (a) les gradients colinéaires à l'extérieur de l'articulation ; (b) position où les gradients ne sont pas colinéaires

4.4.4. Suivi du maillage

Le suivi du maillage est utilisé pendant l'animation pour corriger la déformation du maillage produite soit par l'enrobage linéaire (LBS), ou par *"Dual quaternion"* (DQS). L'idée principale est de projeter chaque sommet de telle sorte que sa distance à la surface volumétrique soit la même que dans sa pose initiale. Pour ce faire, la projection du sommet est effectuée à plusieurs reprises jusqu'à sa convergence. Enfin, nous appliquons un lissage Laplacien dans les régions du contact pour réduire les traits nets produits par les étapes de projection.

4.4.4.1. Projection des sommets

Lors de l'étape de projection du sommet, chaque sommet v est déplacé le long du gradient de sa fonction de champ g associée jusqu'à ce qu'il atteigne sa distance d'origine d_{init} par rapport à la surface volumétrique. Nous utilisant des itérations de Newton avec $\sigma = 0.35$, afin de fournir une convergence robuste, rapide et précise. La projection est effectuée à l'aide de la formule suivante

$$v' = v + \sigma\left(d_{init} - g\left(v\right)\right)\frac{\nabla g\left(v\right)}{\left\|g\left(v\right)\right\|} \quad (4.10)$$

Le principal critère de convergence est lorsque le sommet a atteint sa distance initiale par rapport à sa surface volumétrique associée, c'est-à-dire lorsque $\left|d_{init} - g\left(v\right)\right| < \varepsilon$.

De plus, afin d'éviter les auto-intersections dans le maillage, nous devrions arrêter l'itération lorsque les sommets atteignent une région de contact. Les surfaces de contact correspondent aux discontinuités du gradient du champ de potentiel. Pour détecter le contact, nous effectuons le test suivant durant la projection : pour chaque sommet, nous gardons la trace de l'angle λ entre les gradients de deux itérations consécutives. Si l'angle λ est supérieur à une valeur $\lambda_{\max}$ qui est définie par l'utilisateur, on considère que le sommet se trouve sur une surface de contact. Pour nous simulation, nous avons choisi $\lambda_{\max} = 25^{\circ}$.

4.4.4.2. Relaxation tangentielle des sommets

La position initiale d'un sommet généré par une transformation d'enrobage standard (LBS ou DQS) peut être très loin de sa position optimale. Ainsi, se limiter seulement à étape la projection précédente peut produire des distorsions des faces du maillage et causer des auto-intersections. Dans l'objectif d'améliorer le suivi des sommets dans le champ de gradient, nous avons introduit en plus une étape de relaxation tangentielle qui effectuée après l'étape de projection. Cette étape consiste à faire bouger chaque sommet vers le barycentre pondéré de ses sommets voisins.

Précisément, soit un sommet v, et q_j son premier anneau de sommet voisin projeté sur son plan tangent. Dans une première étape, nous cherchons les coordonnées barycentriques ψ_j à l'aide de la méthode des coordonnées moyennes (*Mean Value Coordinates*) [65] tel que $v = \sum_j \psi_j q_j$.

Chaque étape de relaxation déplace les sommets de façon tangentielle en utilisant l'expression suivante :

$$v' = (1-\eta)v + \eta \sum_j \psi_j q_j \quad (4.11)$$

avec $\eta \in [0,1]$ un paramètre qui permet de contrôler la force de la relaxation.

La relaxation n'a pas d'effet sur le maillage à l'état de repos, tandis qu'après la déformation et la projection elle améliore la répartition des sommets en reproduisant leur organisation initiale. Pratiquement, une étape de relaxation est appliquée après chaque étape de projection d'un sommet. Le paramètre η est défini de façon à ce que les sommets proches de leur distance d_{init} (par rapport au modèle volumétrique) ciblée soient légèrement déplacés. Ceci est configuré par :

$$\eta = \max\left(0{,}1 - \left(\left|g(v) - d_{init}\right| - 1\right)^4\right) \quad (4.12)$$

4.4.4.3. Lissage de surface

Nous utilisons le lissage Laplacien pour éliminer les caractéristiques pointues introduites par les étapes de projection précédentes. Ce lissage doit être appliqué immédiatement après la dernière projection du sommet en utilisant la formule suivante :

$$\tilde{v} = (1 - \mu)v' + \mu C_v \quad (4.13)$$

Chaque sommet v' après la projection est déplacé vers le centroïde C_v qui est le barycentre de son premier anneau de voisinage. Le paramètre μ contrôle le taux du lissage. Cette étape de lissage est appliquée seulement pour les sommets du maillage situés dans des zones de contact, de façon à ce que les détails présentés ailleurs dans la surface du maillage soient réservés. Pour ce faire, nous avons défini le paramètre $\mu = 1$ pour les sommets arrêtés à une discontinuité de gradient, et $\mu = 0$ pour les autres sommets. Un exemple de résultat du lissage Laplacien est illustré sur la figure 4.7. Comme résultat, cette étape permet de lisser efficacement les oscillations du maillage sur les arêtes,

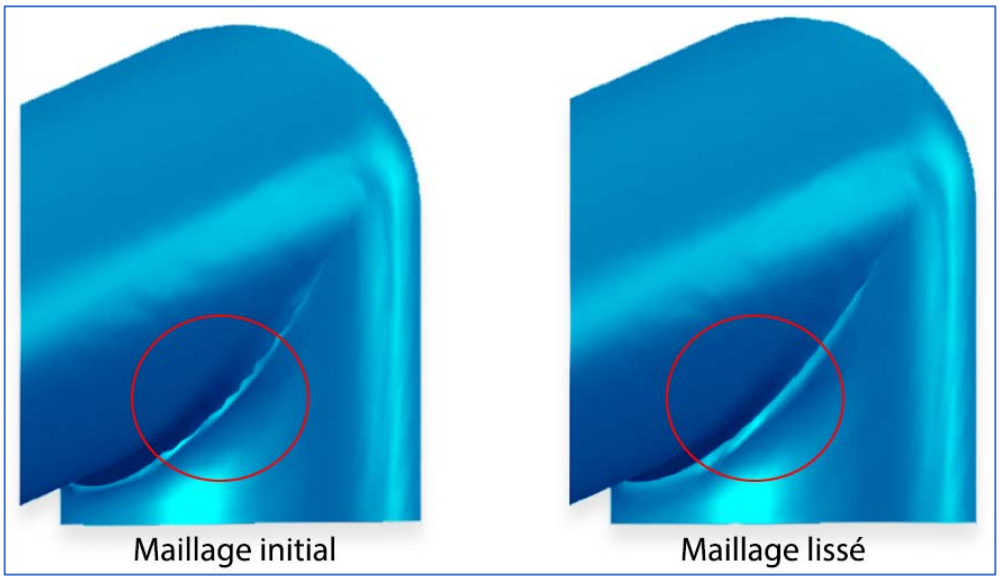


Figure 4-7 : (a) Surface du maillage présentant un motif en dents de scie ; (b) maillage après l'application du lissage Laplacien

4.4.5. Algorithme de déplacement des sommets

Nous commençons le processus de déformation par partitionner le maillage de la main en segments suivant les articulations du squelette. Puis, pour chaque segment du maillage nous ajoutons des primitives sphériques au niveau des articulations. Ensuite, nous construisons la forme volumétrique M_e associée à chaque segment du maillage à l'aide des primitives sphériques (paragraphe 4.4.1). Ensuite, pour chaque sommet v nous calculons et stockons sa distance d_{init} par rapport à sa forme volumétrique associée M_e. Dans nos simulations, la déformation initiale du maillage est effectuée en utilisant la méthode de DQS. Cette transformation est appliquée aussi sur les formes volumétriques M_e. Ensuite pour chaque forme M_e, nous générons sa primitive à support compact g_e (champ potentiel) associée. Puis, nous composons tous les champs potentiels g_e pour construire un champ global G.

Au final, nous corrigeons les positions des sommets du maillage de manière à ce qu'ils gardent la même distance par rapport à la forme volumétrique. L'algorithme 4.1 décrit le processus de marche d'un sommet pour corriger sa position après la déformation du maillage.

Algorithme 4.1 : Déformation implicite basée sur des forme volumétrique

Entrée : Champ potentiel G ; Sommet v avec d_{init} sa distance initiale par rapport à M_e ; δ un facteur d'itération
Sortie : Nouvelle position de v

1. Calculer la valeur du champ en v : $f = G(v)$
2. Calculer le gradient en v : $\vec{h} = \nabla G(v)$
3. Calculer la distance $d = f - d_{init}$
4. **Si** $|d| < \tau$ **alors** *// Cas d'arrêt : le point est déjà à une distance* d_{init}
5. **Retourne** v
6. **Fin si**
7. Calculer le vecteur de déplacement $\vec{k} = -\delta d \dfrac{\vec{h}}{\|\vec{h}\|^2}$
8. Calculer $v' = v + \vec{k}$ *//Avancer le point dans la direction du déplacement*

9. Calculer la distance $d' = G(v') - d_{init}$

10. Si $d(d - d') < 0$ **alors** *//Cas d'arrêt : la distance entre* v *et la forme a augmenté*

11. **Retourner** v

12. Fin si

13. Retourner v' *// Distance avancée d'une longueur totale de* $\vec{k}$

4.5. Résultats de simulation

Dans le présent paragraphe, nous évaluons les résultats obtenus par l'approche de DBVS qui démontrent son efficacité en matière de plausibilité visuelle et performances d'exécution. Les résultats présentent des améliorations au niveau de la déformation d'un maillage de main virtuelle, par l'utilisation de deux méthodes classiques d'enrobage (LBS et DQS).

Comme expliqué dans le paragraphe 4.3, les données d'entrée sont le maillage de main et le squelette d'animation. Nous avons utilisé le logiciel de simulation Blender [20] pour créer et ajuster les poids d'enrobage. En se basant sur ces poids, nous avons pu partitionner le maillage autour de chaque os à l'aide d'un script sous MATLAB [134]. Plus précisément, chaque sommet a été attribué à l'os avec le poids le plus élevé (figure 4.8).

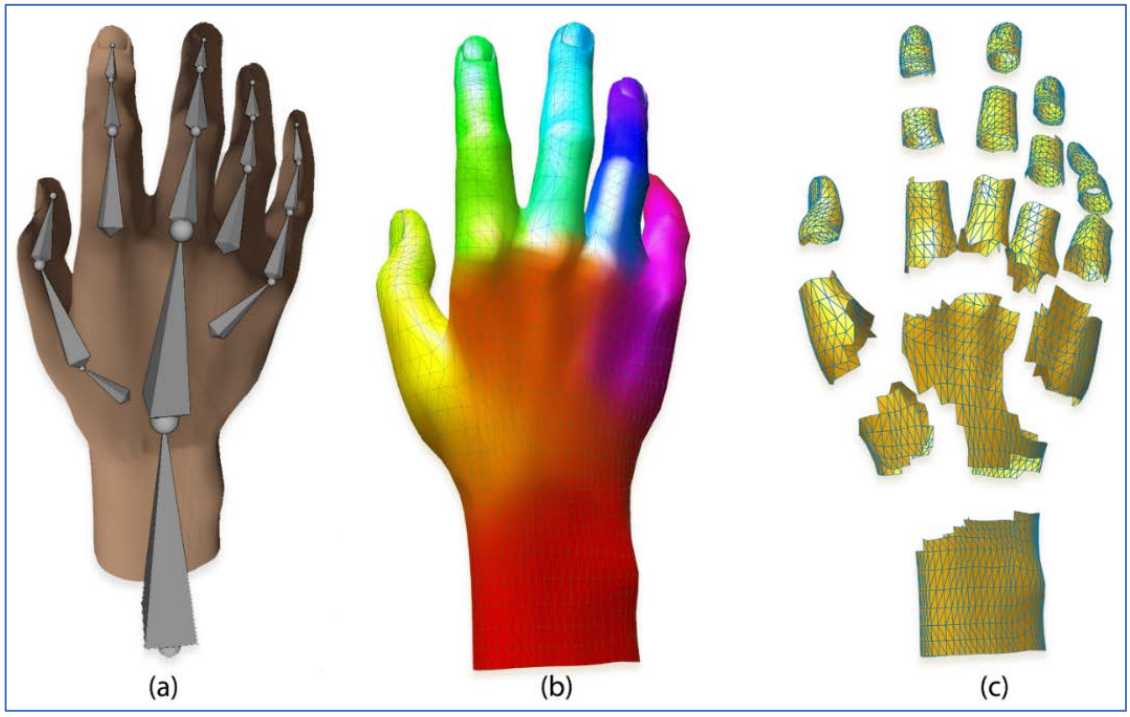


Figure 4-8 : Configuration d'entrée ; (a) squelette d'animation ; (b) poids d'enrobage ; (c) partitionnement du maillage

Le partitionnement est nécessaire pour la reconstruction de surface, qui a été faite avec des primitives sphériques. Les positions des sphères sont données en entrée, et chaque sphère est affectée à un os, il reste donc un peu de travail pour faire l'approximation du maillage par des primitives sphériques. La figure 4.9 montre une illustration des approximations que nous avons effectuées pour le modèle de la main.

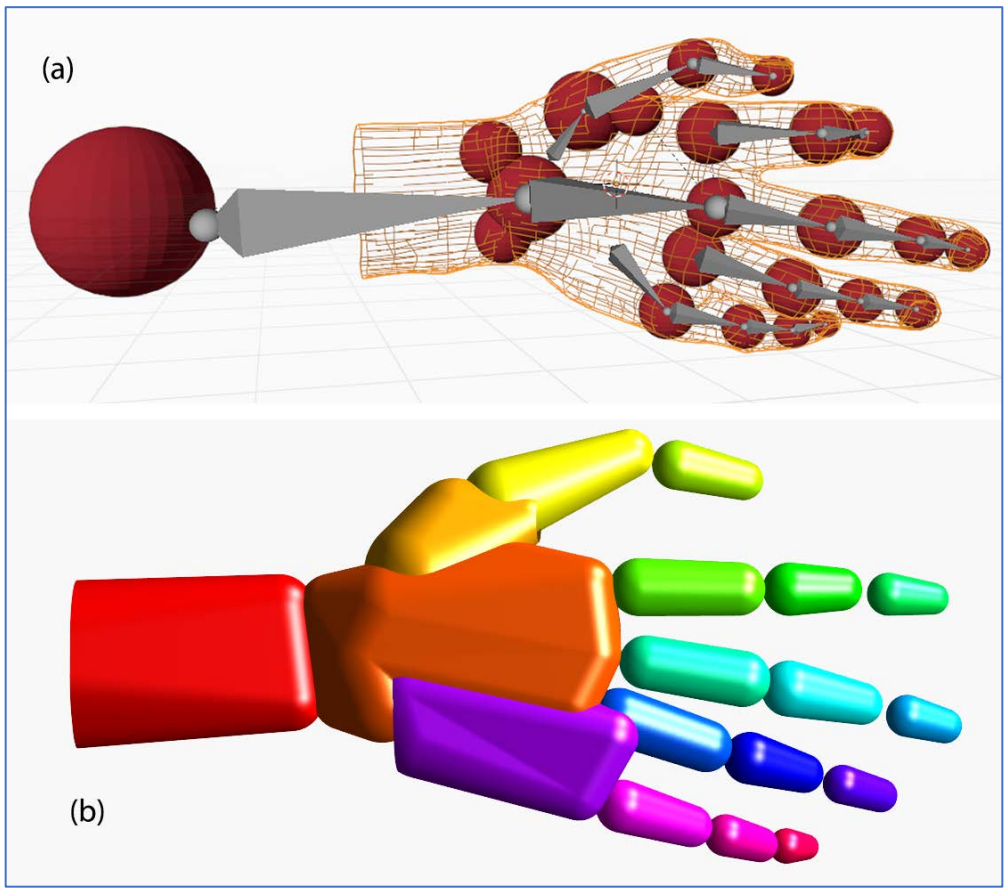


Figure 4-9 : (a) Définition des sphères au niveau des articulation de squelette d'animation ; (b) représentation volumétrique résultante

Obtenir les approximations correctes de la surface du maillage était un peu plus difficile. Le premier problème que nous avons résolu a été de combler les trous laissés aux extrémités des segments du maillage. Ceci est important car deux surfaces voisines doivent se joindre sans introduire de lacunes ou de discontinuités de gradient. De ce point de vue, les primitives sphériques sont meilleures, comme on peut le voir sur la figure 4.10.

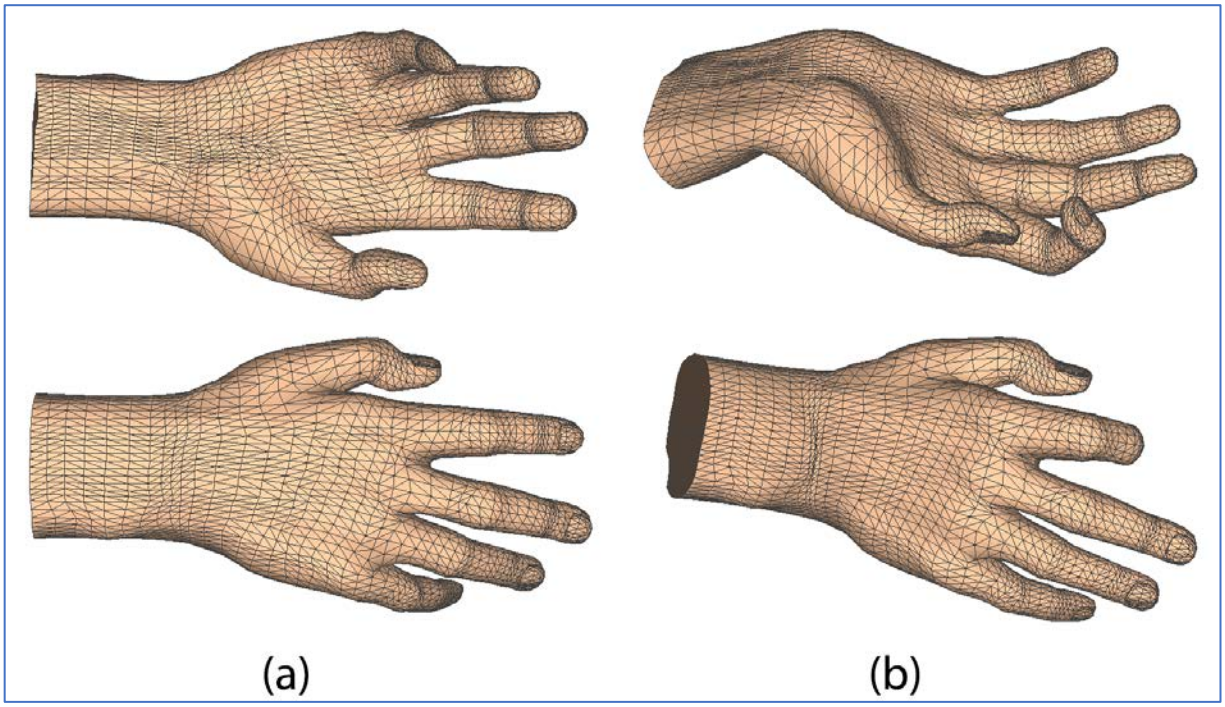


Figure 4-10 : Composition des segments de main lors de la déformation est effectuée sans introduire de lacunes ; (a) maillage initial ; (b) maillage déformé

Nous avons testé notre approche avec trois opérateurs de composition (union, gradient, poids de mélange). La rangée du haut de la figure 4.11 montre les formes volumétriques combinées avec l'opérateur union, l'opérateur basé sur le gradient et l'opérateur utilisant le poids de mélange. Dans la rangée du bas, le résultat de la colonne (a) montre une simulation mal ajustée produite par l'opérateur d'union. La colonne (b) montre une simulation avec un effet de renflement plus exagéré cela ressemble à une mauvaise déformation. La simulation de la colonne (c) montre que le maillage est plus attrayant du côté intérieur lorsque nous utilisons l'opérateur de composition basé sur le gradient contrôlé avec un poids de mélange.

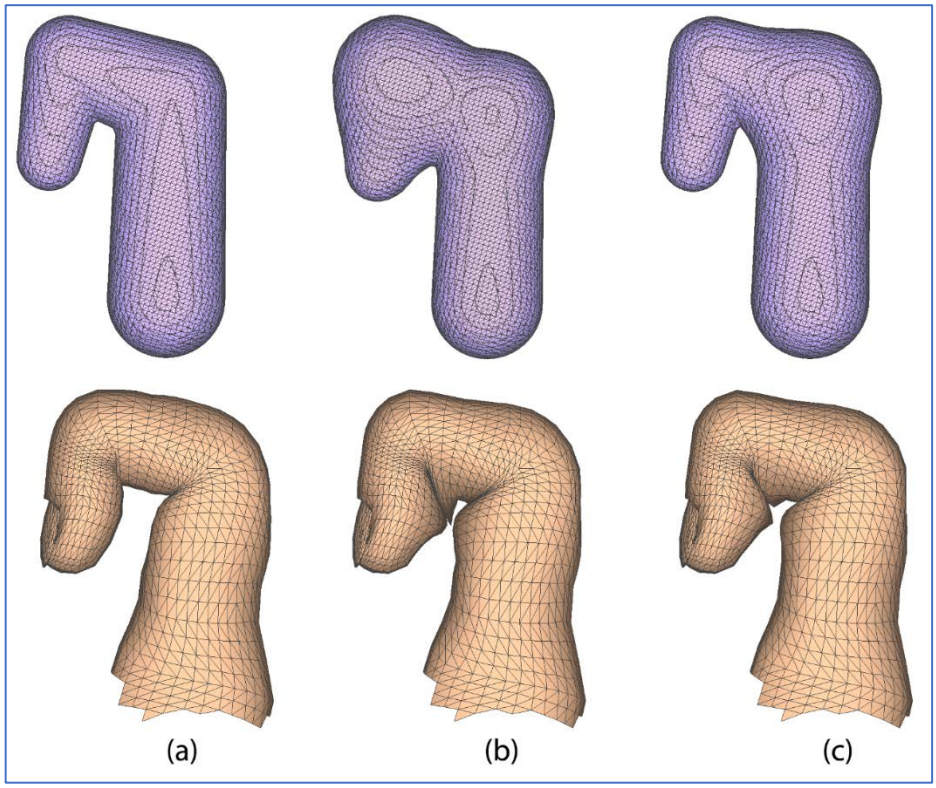


Figure 4-11 : Déformation d'index avec différentes compositions des formes volumétriques ; (a) en utilisant l'opérateur union ; (b) avec l'opérateur basé sur le gradient ; (c) en utilisant un poids de mélange

4.6. Performances de calcul

Nous avons effectué les simulations sur un PC avec processeur Intel i7-4720HQ de capacité 2.60 GHz, un GPU GeForce 480 GTX, et une RAM de 16GB. Toutes les fonctions sont vectorisées par sommets, ce qui permet des performances de calcul décentes.

Nous avons utilisé deux maillages de main virtuelle ; le premier à basse résolution avec 3 056 sommets, tandis que la deuxième à haute résolution avec 13 236 sommets. Dans le tableau 4.1, nous avons résumé les performances de déformation des deux maillages en utilisant la méthode de déformation basée sur les formes volumétriques (DBVS) et la méthode HRBF proposé par Vaillant et al. [138, 139] ainsi que la déformation avec l'enrobage classique en DQS.

Les simulations avec la méthode de DBVS (tableau 4.1) sont effectuées en utilisant deux opérateurs de mélange (union et mélange basé gradient). À partir de ces résultats, nous notons que la déformation en DBVS est plus rapide en temps d'exécution que la méthode basée sur les HRBF. Davantage, l'utilisation de l'opérateur d'union accélère plus le processus de déformation.

Maillage	Méthode DBVS (s)	Méthode HRBF (s)	Méthode DQS (ms)
Basse résolution (Mélange basé gradient)	4.0	5.2	14.5
Haute résolution (Mélange basé gradient)	5.6	8.6	92
Basse résolution (Union)	0.76	1.4	6.5
Haute résolution (Union)	1.35	2.15	7.7

Tableau 4-1 : Temps d'exécution de l'approche de DBVS en comparaison avec l'approche d'HRBF [138] et l'approche de DQS

4.7. Paramètres du contrôle de la déformation

Lors de l'animation, le choix de la méthode d'enrobage utilisée pour obtenir une déformation initiale est un critère qui influence le résultat final de la déformation. Dans notre implémentation, nous prenons en charge les méthodes de LBS et DQS (Annexe B et C), mais d'autres méthodes pourraient être facilement intégrées. Par défaut, nous utilisons le DQS car il permet d'éviter le problème de perte de volume connu sous le nom *d'effet d'enveloppe de bonbons* et il est moins susceptible de produire des auto-intersections profondes.

Le seuil R est un autre paramètre de contrôle de la déformation utilisé pour convertir les champs à support global en champ à support compact (paragraphe 4.4.2). Ce paramètre a pour effet d'augmenter ou de diminuer le renflement (figure 4.12).

D'après ces résultats, nous pouvons voir que les renflements musculaires augmentent au fur et à mesure que le seuil augmente. L'utilisateur peut donc modifier ce paramètre, pour arriver au renflement musculaire souhaité.

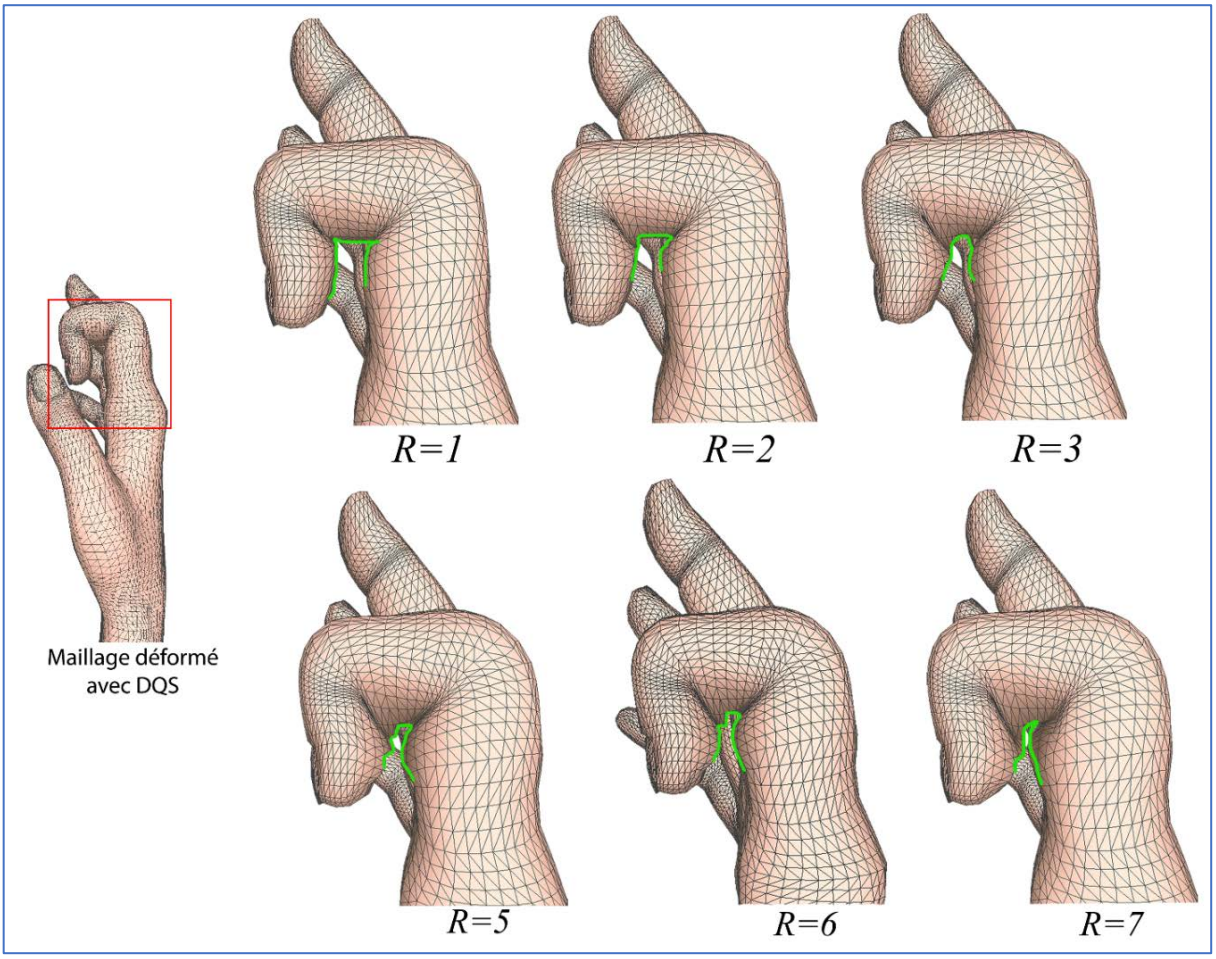


Figure 4-12 : Index déformé avec différentes valeurs du seuil R

Le contrôle fin de l'effet de renflement est effectué par les paramètres θ_1 et θ_2 qui sont utilisés dans l'étape de composition. Ils peuvent être modifiés pour simuler différents types de matériaux, comme le caoutchouc ou la peau. Parce qu'il est assez fastidieux de les régler correctement et que nous ne nous intéressions qu'aux déformations de la main, nous avons généralement utilisé les paramètres cités dans le paragraphe 4.4.3. La figure 4.13 illustre l'impact des deux paramètres θ_1 et θ_2 sur le renflement de muscle lors de la déformation d'index.

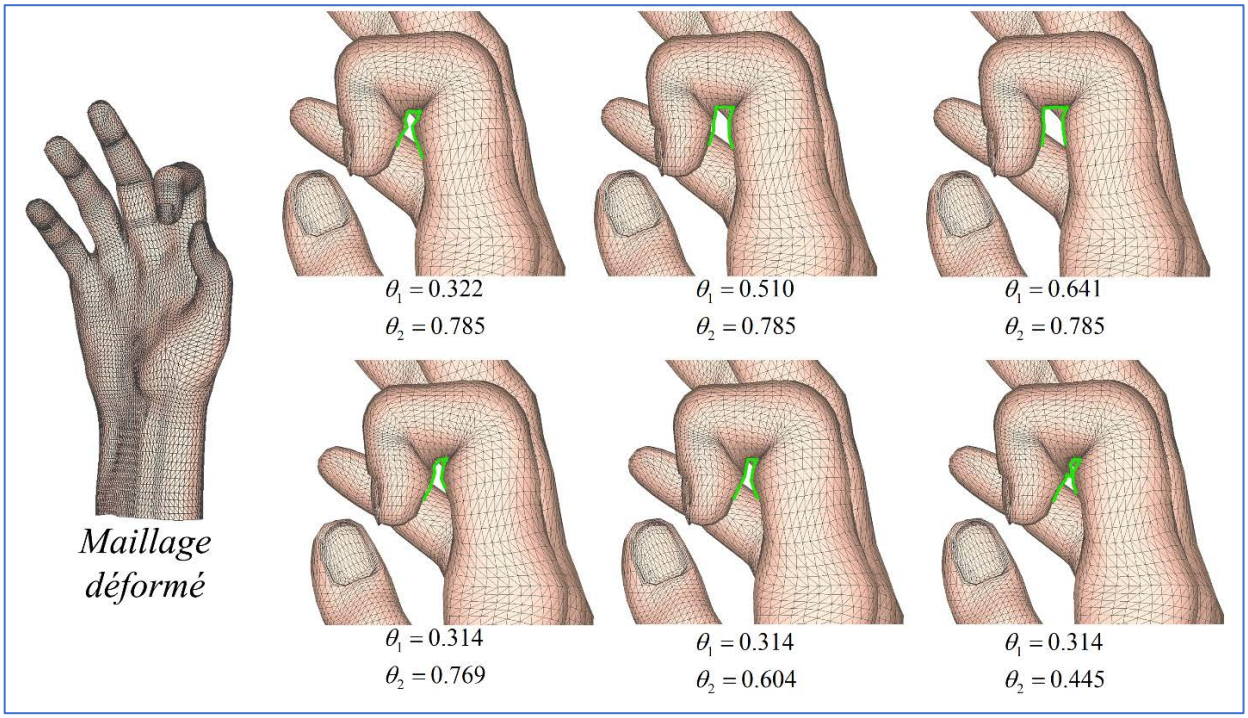


Figure 4-13 : Impact du choix des paramètres θ_1 et θ_2 sur le renflement des muscles lors de la déformation

4.8. Comparaison de DBVS avec les méthodes alternatives

a) Comparaison avec la méthode de DQS

Nous avons effectué une comparaison en matière de qualité de résultats entre la méthode de DBVS et la méthode de DQS. Bien que cette dernière soit connue par son succès à résoudre l'effet d'enveloppe de bonbons, elle souffre encore de problème de perte de volume. Les résultats montrent que la qualité de déformation est significativement améliorée en utilisant la méthode de DBVS après une déformation initiale en utilisant DQS, comme illustré sur la figure 4.14, les régions améliorées sont marquées par des cercles rouges.

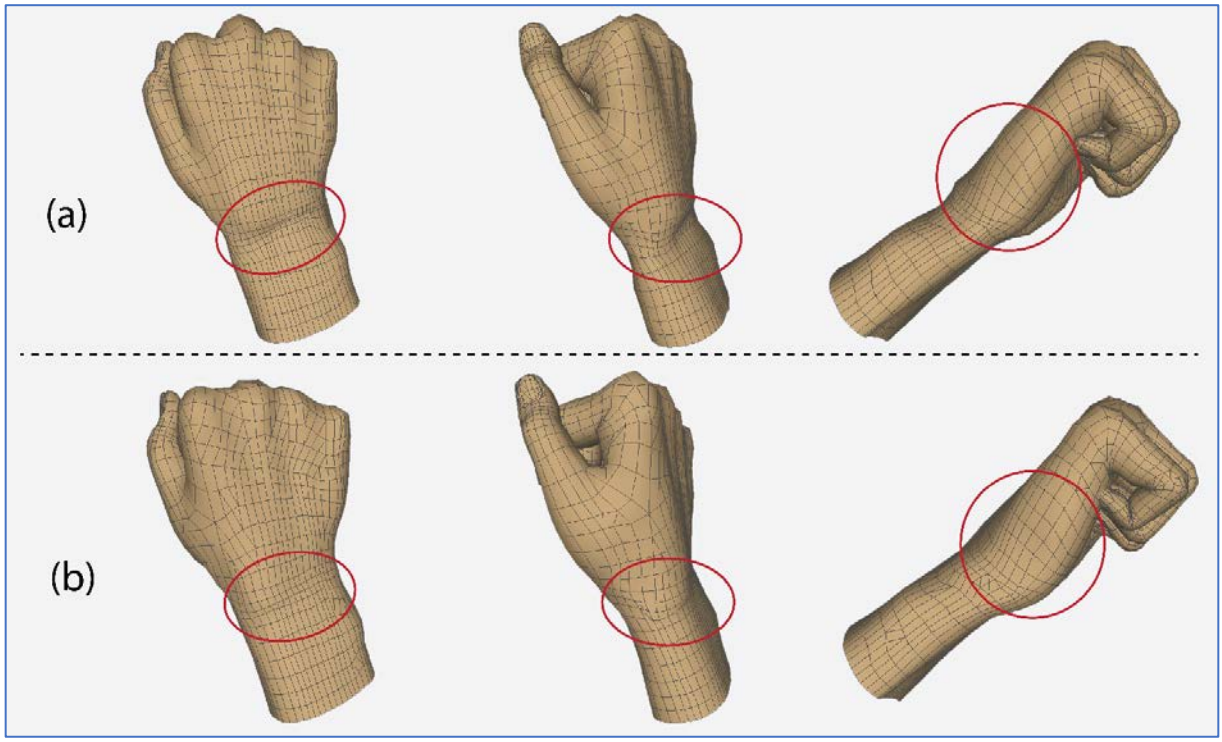


Figure 4-14 : Comparaison de DBVS avec la méthode DQS ; (a) déformation avec DQS ; (b) déformation avec DBVS ; Le cercle rouge montre les régions améliorées par DBVS

b) Comparaison avec la méthode de LBS

Nous pouvons également montrer l'efficacité de la déformation par DBVS pour préserver le volume du maillage et éviter les auto-intersections résultantes avec l'utilisation de la méthode LBS. Ces artefacts, apparaissent en majorité dans les régions de contact comme on peut le voir sur la figure 4.15.

On peut observer sur le maillage de ce modèle l'effet de perte de volume et de génération d'auto-intersections lorsqu'il est déformé avec la méthode LBS (figure 4.15 (a)), l'effet de gonflement avec des quaternions duaux (figure 4.15 (b)), et l'amélioration de ces problèmes avec l'approche de DBVS (figure 4.15 (c)).

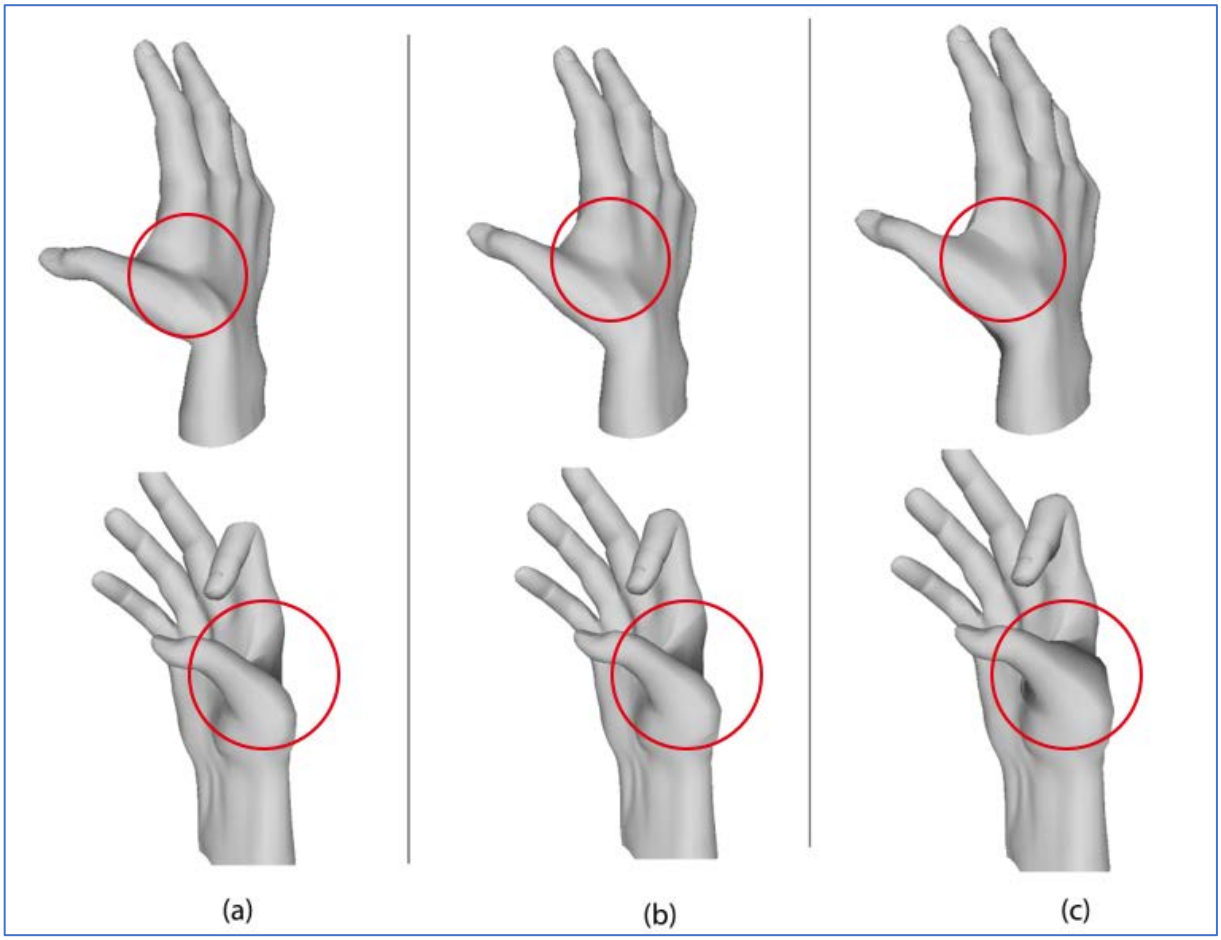


Figure 4-15 : Comparaison des résultats de déformation avec (a) LBS ; (b) Dual-quaternion ; (c) DBVS ; Le cercle rouge montre les régions de contact ciblées par l'amélioration

c) Comparaison avec la méthode d'HRBF

Nous avons comparé la méthode de DBVS avec la méthode de HRBF [138]. Cette dernière suit la même idée d'ajustement de position des sommets une déformation initiale effectuée après un enrobage classique. Les figures 4.16 et 4.17 illustrent les résultats de cette comparaison.

Comme on peut le voir sur la figure 4.16, la déformation de l'index en utilisant les HRBF génère des distorsions dans la partie supérieure de la surface d'index. Ceci est dû à l'approximation en iso-surface utilisée pour contrôler la déformation du maillage. Par contre, le maillage de l'index est plus attrayant lors de l'application de DBVS.

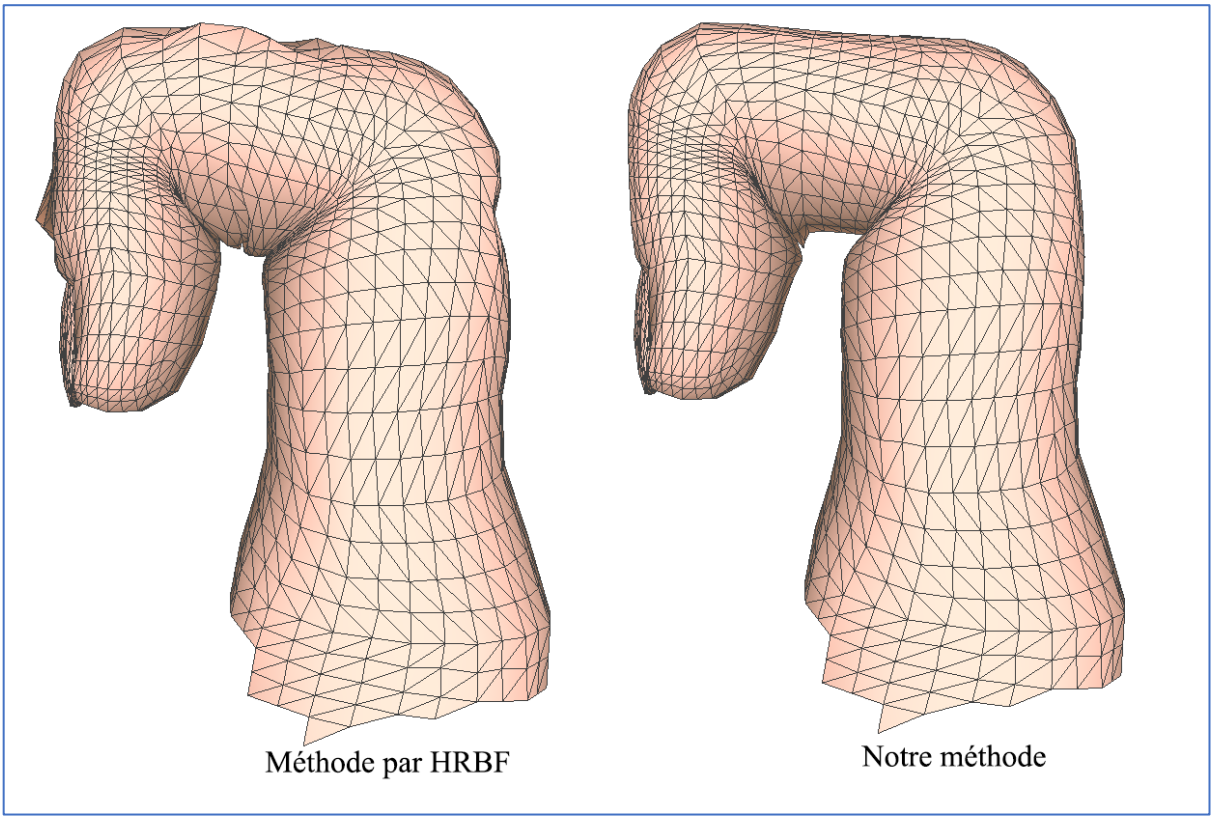


Figure 4-16 : Comparaison de la déformation DBVS avec HRBF au niveau de la forme du maillage

La déformation à base de HRBF peut également souffrir du problème des surfaces qui ne se joignent pas en douceur. En effet, le poignet, la paume et les bases du pouce et du petit doigt sont composés de surfaces approximativement planes. Ainsi, il peut arriver que ces surfaces soient mal alignées. Ceci est montré sur la figure 4.17, où l'on peut voir une bosse près du poignet dans le cas d'une approche HRBF. Par contre, la méthode DBVS produit des meilleurs résultats. En effet, le mélange effectué à l'aide d'opérateur basé sur un gradient contrôlé par le paramètre de pondération permet d'éviter ce genre de problème.

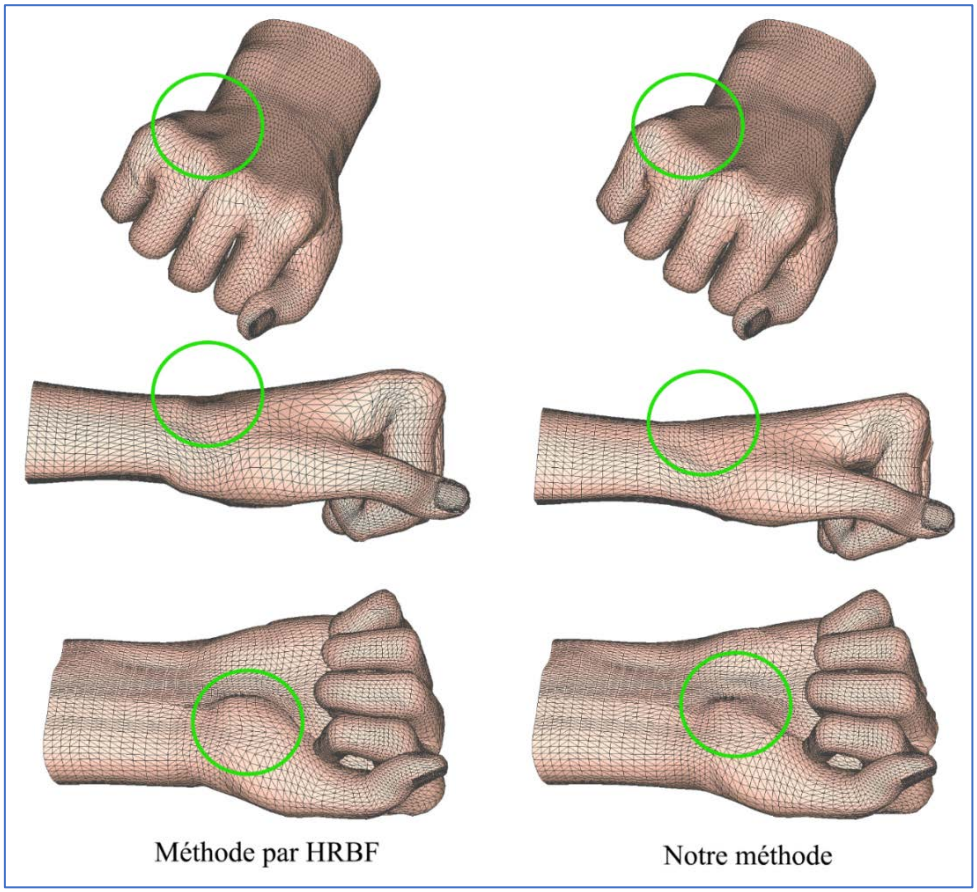


Figure 4-17 : Comparaison de DBVS avec HRBF au niveau de l'alignement de surfaces

4.9. Conclusion

Dans le présent chapitre nous avons présenté une contribution qui rentre dans le cadre de travaux de recherche sur la modélisation et l'animation des corps mous virtuels associés à un squelette. La contribution concerne la méthode de déformation basée sur des formes volumétriques (DBVS) qui fonctionne comme une étape de post-traitement sur une simulation du maillage de la main déformé à l'aide des méthodes d'enrobage standard. Nous avons détaillé ses différentes étapes, puis nous avons présenté les résultats obtenus avec différents paramètres de simulation. Nous avons aussi, comparé ces résultats avec ceux des autres méthodes à savoir les méthodes de LBS, DQS et HRBF. Les résultats des simulations et de comparaison sont très satisfaisants. En effet, les différents résultats montrent, d'une part, la qualité de la simulation produite par la méthode DBVS et d'autre part, l'impact des paramètres de contrôle sur les résultats obtenus. Les résultats sont encourageants surtout que le processus de DBVS s'adapte bien avec le pipeline disponible dans les logiciels de modélisation et déformation.

Conclusion générale

Au cours de cette thèse, nous avons présenté différentes approches d'animation et de modélisation des objets 3D dont certaines caractéristiques géométriques sont conservées une fois plongées dans une scène d'animation 3D. Les méthodes permettent d'améliorer l'aspect intrinsèque des objets tout en donnant à l'artiste un contrôle sur le résultat de la simulation. Le but des méthodes présentées dans ce document était de réaliser des modèles plausibles tout en assurant :

- Une crédibilité visuelle des modèles 3D résultants.
- Un degré de contrôle de l'utilisateur sur les résultats de la déformation.
- Une efficacité au niveau du temps de calcul des simulations.

Le premier chapitre a été consacré à la présentation de l'état de l'art des différentes méthodes de modélisation et de déformation de modèles virtuels. Nous avons détaillé les différentes méthodes de représentation de surface pour l'animation et la modélisation, et les deux approches de déformation les plus utilisées à savoir les approches physiques et géométriques. Enfin, nous avons passé en revue les approches de déformation alternatives qui préservent les contraintes intrinsèques de la surface (volume ou longueurs).

Le deuxième chapitre a été consacré à la présentation d'une nouvelle méthode de génération de plis pour les vêtements portés par des personnages. Nous avons explicité la méthode de déformation du maillage du vêtement en utilisant une approximation avec des surfaces implicites basées sur les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF). Nous avons ensuite détaillé le processus de génération de plis en se basant sur la génération des courbes de plis dans les régions affectées par une forte déformation du maillage.

Le troisième chapitre a été consacré à la présentation d'une nouvelle méthode de positionnement du vêtement sur un corps humain 3D avec différentes formes et postures. Cette méthode nécessite aucun modèle de référence et elle est basée sur l'idée d'établir une correspondance entre le corps humain cible et le modèle du vêtement. Afin d'assurer cette correspondance, nous avons effectué une déformation du maillage du vêtement à l'aide de la méthode de déformation basée sur l'approximation par des fonctions de base radiale d'Hermite (HRBF).

Le quatrième chapitre présente une nouvelle méthode de déformation implicite basée sur le suivi du maillage à l'aide des formes volumétriques. Cette contribution a pour objectif de surmonter les défauts de l'enrobage standard (LBS et DQS), en ajoutant une étape de correction comme post-traitement du maillage déformé. La correction des positions est effectuée à l'aide du suivi des distances des sommets par rapport à la forme volumétrique.

La qualité des travaux présentés dans cette thèse est confirmée et validée par des expérimentations détaillées sur divers modèles et scènes 3D, ainsi que par des comparaisons avec des méthodes bien établies dans la littérature.

Dans la continuité de cette thèse, des améliorations sont encore envisageables, et ce, à plusieurs niveaux :

- Améliorer la méthode d'ajout de plis afin de supporter l'approximation des vêtements avec des surfaces ouvertes (*Openboundary Surfaces*) telles que les vêtements ouverts (châle, jacket …) ;
- Améliorer la méthode d'ajout de plis afin qu'elle puisse générer des plis statiques qui se présentent dans les zones de courbure gaussienne négative ;
- Nous suggérons que les travaux futurs explorent la sélection de direction des plis en se basant sur un choix d’utilisateurs ;
- Étudier la satisfaction des consommateurs potentiels en recueillant leurs évaluations des résultats de l'habillage des vêtements (système d’essayage).

Bibliographie

[1] Ait Mouhou, A., Saaidi, A., Ben Yakhlef, M., & Abbad, K. (2017). Analytical View of Augmenting Coarse Cloth Simulations with Wrinkles. In First International Conference on Real Time Intelligent Systems (pp. 497-507). Springer, Cham.

[2] Ait Mouhou, A., Saaidi, A., Ben Yakhlef, M., & Abbad, K. (2019, December). A study and implementation of the hand deformation using implicit skinning. In 2019 International Conference on Intelligent Systems and Advanced Computing Sciences (ISACS) (pp. 1-7). IEEE.

[3] Ait Mouhou, A., Saaidi, A., Ben Yakhlef, M., & Abbad, K. (2021). Wrinkle synthesis for cloth mesh with Hermite radial basis functions. Multimedia Tools and Applications, 80(1), 1583-1610. DOI: https://doi.org/10.1007/s11042-020-09743-3

[4] Ait Mouhou, A., Saaidi, A., Ben Yakhlef, M., & Abbad, K. Virtual Hand Skinning Using Volumetric Shape, International Journal of Computer Aided Engineering and Technology (In Production).

[5] Alexa, M. (2002). Linear combination of transformations. ACM Transactions on Graphics (TOG), 21(3), 380-387.

[6] Anderson, E. F. (2001). Real-time character animation for computer games (Doctoral dissertation, The National Centre for Computer Animation).

[7] Angelidis, A., & Singh, K. (2006). Space deformations and their application to shape modeling. In ACM SIGGRAPH 2006 Courses (pp. 10-29).

[8] Angelidis, A., Wyvill, G., & Cani, M. P. (2004, June). Sweepers: Swept user-defined tools for modeling by deformation. In Proceedings Shape Modeling Applications, 2004. (pp. 63-73). IEEE.

[9] Anguelov, D., Srinivasan, P., Koller, D., Thrun, S., Rodgers, J., & Davis, J. (2005). Scape: shape completion and animation of people. In ACM SIGGRAPH 2005 Papers (pp. 408-416).

[10] Anjyo, K., Todo, H., & Lewis, J. P. (2012). A practical approach to direct manipulation blendshapes. Journal of Graphics Tools, 16(3), 160-176.

[11] Assassin's Creed Syndicate jeu video de Ubisoft site web (2021): https://www.ubisoft.com/en-us/game/assassins-creed-syndicate/

[12] Aujay, G., Hétroy, F., Lazarus, F., & Depraz, C. (2007, August). Harmonic skeleton for realistic character animation. In SCA'07-ACM-SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (pp. 151-160). Eurographics Association.

[13] Autodesk 3ds Max, (***site web 2021***): https://www.autodesk.com/3ds-max/

[14] Autodesk Maya, (***site web 2021***): http://autodesk.com/maya

[15] Baraff, D., & Witkin, A. (1998, July). Large steps in cloth simulation. In Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 43-54).

[16] Baran, I., & Popović, J. (2007). Automatic rigging and animation of 3d characters. ACM Transactions on graphics (TOG), 26(3), 72-es.

[17] Bergou, M., Mathur, S., Wardetzky, M., & Grinspun, E. (2007). Tracks: toward directable thin shells. ACM Transactions on Graphics (TOG), 26(3), 50-es.

[18] Bernhardt, A., Barthe, L., Cani, M.-P. & Wyvill, B. (2010), Implicit Blending Revisited. Computer Graphics Forum, 29: 367-375.

[19] Bhatnagar, B. L., Tiwari, G., Theobalt, C., & Pons-Moll, G. (2019). Multi-garment net: Learning to dress 3d people from images. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 5420-5430).

[20] Blender, open-source 3D computer graphics software, (***site web 2021***): https://www.blender.org/

[21] Blinn, J. F. (1982). A generalization of algebraic surface drawing. ACM transactions on graphics (TOG), 1(3), 235-256.

[22] Bloomenthal, J. (1997). Bulge elimination in convolution surfaces. In Computer Graphics Forum (Vol. 16, No. 1, pp. 31-41). Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishers Ltd.

[23] Botsch, M., Kobbelt, L., Pauly, M., Alliez, P., & Lévy, B. (2010). Polygon mesh processing. CRC press.

[24] Botsch, M., Pauly, M., Rossl, C., Bischoff, S., & Kobbelt, L. (2006). Geometric modeling based on triangle meshes. In ACM SIGGRAPH 2006 Courses (pp. 1-es).

[25] Breen, D. E., House, D. H., & Wozny, M. J. (1994, July). Predicting the drape of woven cloth using interacting particles. In Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 365-372).

[26] Bridson, R., Fedkiw, R., & Anderson, J. (2002, July). Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation. In Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 594-603).

[27] Brouet, R., Sheffer, A., Boissieux, L., & Cani, M. P. (2012). Design preserving garment transfer. ACM Transactions on Graphics, 31(4), Article-No.

[28] Cani, M. P. (1993, August). An implicit formulation for precise contact modeling between flexible solids. In 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH'93)) (pp. 313-320). ACM SIGGRAPH.

[29] Cani-Gascuel, M. P., & Desbrun, M. (1997). Animation of deformable models using implicit surfaces. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 3(1), 39-50.

[30] Carignan, M., Yang, Y., Thalmann, N. M., & Thalmann, D. (1992). Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. ACM Siggraph Computer Graphics, 26(2), 99-104.

[31] Catmull, E., & Clark, J. (1978). Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. Computer-aided design, 10(6), 350-355.

[32] Cetinaslan, O., & Orvalho, V. (2018, June). Direct manipulation of blendshapes using a sketch-based interface. In Proceedings of the 23rd International ACM Conference on 3D Web Technology (pp. 1-10).

[33] Chen, M., & Tang, K. (2010). A fully geometric approach for developable cloth deformation simulation. The visual computer, 26(6), 853-863.

[34] Chen, Y., Zhu, Q. H., Kaufman, A., & Muraki, S. (1998, June). Physically-based animation of volumetric objects. In Proceedings Computer Animation'98 (Cat. No. 98EX169) (pp. 154-160). IEEE.

[35] Choi, K. J., & Ko, H. S. (2005). Stable but responsive cloth. In ACM SIGGRAPH 2005 Courses (pp. 1-es).

[36] Clemens G, Arnulph F & Volker L (2003) Automatic pre-positioning of virtual clothing. In Proceedings of the 19th Spring Conference on Computer Graphics (SCCG '03). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 99,108.

[37] Coquillart, S. (1990, September). Extended free-form deformation: A sculpturing tool for 3D geometric modeling. In Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 187-196).

[38] Crane, K. (2018). Discrete differential geometry: An applied introduction. Notices of the AMS, Communication, 1153-1159.

[39] Cutler, L. D., Gershbein, R., Wang, X. C., Curtis, C., Maigret, E., Prasso, L., & Farson, P. (2007). An art-directed wrinkle system for CG character clothing and skin. Graphical Models, 69(5-6), 219-230.

[40] Decaudin, P., Julius, D., Wither, J., Boissieux, L., Sheffer, A., & Cani, M. P. (2006, September). Virtual garments: A fully geometric approach for clothing design. In Computer Graphics Forum (Vol. 25, No. 3, pp. 625-634). Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishing, Inc.

[41] DeRose, T., Kass, M., & Truong, T. (1998, July). Subdivision surfaces in character animation. In Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 85-94).

[42] Doo, D., & Sabin, M. (1978). Behaviour of recursive division surfaces near extraordinary points. Computer-Aided Design, 10(6), 356-360.

[43] English, E., & Bridson, R. (2008). Animating developable surfaces using nonconforming elements. In ACM SIGGRAPH 2008 papers (pp. 1-5)

[44] Farin, G. (2014). Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical guide. Elsevier

[45] Faure, F., Gilles, B., Bousquet, G., & Pai, D. K. (2011). Sparse meshless models of complex deformable solids. ACM transactions on graphics (TOG), 30(4), 1-10.

[46] Foley, J. D., Van, F. D., Van Dam, A., Feiner, S. K., Hughes, J. F., Angel, E., & Hughes, J. (1996). Computer graphics: principles and practice (Vol. 12110). Addison-Wesley Professional.

[47] Fordham, J. (2003). Middle earth strikes back. Cinefex, 92, 71-142.

[48] Forsey, D. R., & Bartels, R. H. (1988). Hierarchical B-spline refinement. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 22(4), 205-212.

[49] Gain, J., & Bechmann, D. (2008). A survey of spatial deformation from a user-centered perspective. ACM Transactions on Graphics (TOG), 27(4), 1-21.

[50] Gilles, B., Faure, F., Bousquet, G., & Pai, D. K. (2013). Frame-based interactive simulation of complex deformable objects. In Deformation models (pp. 145-166). Springer, Dordrecht.

[51] Gillette, R., Peters, C., Vining, N., Edwards, E., & Sheffer, A. (2015, August). Real-time dynamic wrinkling of coarse animated cloth. In Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH/eurographics symposium on computer animation (pp. 17-26).

[52] Goldenthal, R., Harmon, D., Fattal, R., Bercovier, M., & Grinspun, E. (2007). Efficient simulation of inextensible cloth. In ACM SIGGRAPH 2007 papers (pp. 49-es).

[53] Gonzalez-Ochoa, C., & Peters, J. (1999, April). Localized-hierarchy surface splines (less). In Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics (pp. 7-15).

[54] Gourmel O, Barthe L et al (2013) A gradient-based implicit blend. ACM Trans. Graph. 32, 2, Article 12 (April 2013), 12 pages.

[55] Guan, P., Reiss, L., Hirshberg, D. A., Weiss, A., & Black, M. J. (2012). Drape: Dressing any

person. ACM Transactions on Graphics (TOG), 31(4), 1-10.

[56] Gundogdu E, Constantin V, Seifoddini A, Dang M, Salzmann M, Fua P (2019) GarNet: A Two-Stream Network for Fast and Accurate 3D Cloth Draping. IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Seoul, Korea (South), 2019, pp. 8738-8747.

[57] Hadap, S., Bongarter, E., Volino, P., & Magnenat-Thalmann, N. (1999, October). Animating wrinkles on clothes. In Proceedings Visualization'99 (Cat. No. 99CB37067) (pp. 175-523). IEEE.

[58] Hahn, F., Martin, S., Thomaszewski, B., Sumner, R., Coros, S., & Gross, M. (2012). Rig-space physics. ACM transactions on graphics (TOG), 31(4), 1-8.

[59] Hahn, F., Thomaszewski, B., Coros, S., Sumner, R. W., Cole, F., Meyer, M., ... & Gross, M. (2014). Subspace clothing simulation using adaptive bases. ACM Transactions on Graphics (TOG), 33(4), 1-9.

[60] Han X, Wu Z, Wu Z, Yu, S. Davis L (2018) VITON: An Image-Based Virtual Try-on Network. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, 2018, pp. 7543-7552,

[61] Hart, J. C. (1998). Morse theory for implicit surface modeling. In Mathematical Visualization (pp. 257-268). Springer, Berlin, Heidelberg.

[62] Hétroy, F., Gérot, C., Lu, L., & Thibert, B. (2009, February). Simple flexible skinning based on manifold modeling. In GRAPP 2009-International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (pp. 259-265).

[63] Hirota, G., Maheshwari, R., & Lin, M. C. (1999, June). Fast volume-preserving free form deformation using multi-level optimization. In Proceedings of the fifth ACM symposium on Solid modeling and applications (pp. 234-245).

[64] Hong, Q., Li, Y., Li, Q., Wang, B., Yao, J., Wu, Q., & She, Y. (2016). An implicit skeleton-based method for the geometry reconstruction of vasculatures. The Visual Computer, 32(10), 1251-1262.

[65] Hormann, K., & Floater, M. S. (2006). Mean value coordinates for arbitrary planar polygons. ACM Transactions on Graphics (TOG), 25(4), 1424-1441.

[66] Hornus, S., Angelidis, A., & Cani, M. P. (2003). Implicit modelling using subdivision-curves. Visual Computer, 19(2-3), 94-104.

[67] Hubert, E., & Cani, M. P. (2012). Convolution surfaces based on polygonal curve skeletons. Journal of Symbolic Computation, 47(6), 680-699.

[68] James, D. L., & Twigg, C. D. (2005). Skinning mesh animations. ACM Transactions on Graphics (TOG), 24(3), 399-407. 55

[69] Jiang L, Ye J, Sun L & Li J (2019). Transferring and fitting fixed-sized garments onto bodies of various dimensions and postures. Computer-Aided Design, 106, 30-42.

[70] Jin O Y, Lee T M, Lee I K (2018) Hierarchical Cloth Simulation using Deep Neural Networks. In Proceedings of Computer Graphics International 2018 (CGI 2018). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA,139146.

[71] Jones, B., Thuerey, N., Shinar, T., & Bargteil, A. W. (2016). Example-based plastic deformation of rigid bodies. ACM Transactions on Graphics (TOG), 35(4), 1-11.

[72] Joshi, P., Meyer, M., DeRose, T., Green, B., & Sanocki, T. (2007). Harmonic coordinates for character articulation. ACM Transactions on Graphics (TOG), 26(3), 71-es.

[73] Kang, Y. M., Choi, J. H., Cho, H. G., & Lee, D. H. (2001). An efficient animation of wrinkled cloth with approximate implicit integration. The Visual Computer, 17(3), 147-157.
[74] Kavan, L., & Žára, J. (2005, April). Spherical blend skinning: a real-time deformation of articulated models. In Proceedings of the 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games (pp. 9-16).
[75] Kavan, L., Collins, S., Žára, J., & O'Sullivan, C. (2008). Geometric skinning with approximate dual quaternion blending. ACM Transactions on Graphics (TOG), 27(4), 1-23.
[76] Kavan, L., Gerszewski, D., Bargteil, A. W., & Sloan, P. P. (2011). Physics-inspired upsampling for cloth simulation in games. In ACM SIGGRAPH 2011 papers (pp. 1-10).
[77] Kavan, L., McDonnell, R., Dobbyn, S., Žára, J., & O'Sullivan, C. (2007, April). Skinning arbitrary deformations. In Proceedings of the 2007 symposium on Interactive 3D graphics and games (pp. 53-60).
[78] Kavan, L., Sloan, P. P., & O'Sullivan, C. (2010, May). Fast and efficient skinning of animated meshes. In Computer Graphics Forum (Vol. 29, No. 2, pp. 327-336). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
[79] Kawabatra, S. (1980). " The Standardization and Analysis of Hand Evaluation". The Textile Machinery Society Japan.
[80] Kimmerle, S., Wacker, M., & Holzer, C. (2004). Multilayered Wrinkle Textures from Strain. In VMV (pp. 225-232).
[81] Kroyer, B. (1986). Animating with a Hierarchy. In Seminar on Advanced Computer Animation SIGGRAPH (Vol. 86).
[82] Kry, P. G., James, D. L., & Pai, D. K. (2002, July). Eigenskin: real time large deformation character skinning in hardware. In Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation (pp. 153-159).
[83] Kühnel, W. (2015). Differential geometry (Vol. 77). American Mathematical Soc..
[84] Lander, J. (1998). Skin them bones: Game programming for the web generation. Game Developer Magazine, 5(1), 10-18.
[85] Larboulette, C., & Cani, M. P. (2004, June). Real-Time Dynamic Wrinkles. In Proceedings of the Computer Graphics International (pp. 522-525).
[86] Lasseter, J. (1987, August). Principles of traditional animation applied to 3D computer animation. In Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 35-44).
[87] Lee Y, Ma J & Choi S (2013) Automatic pose-independent 3D garment fitting. Computers & graphics, 37(7), 911-922.
[88] Lewis, J. P., & Anjyo, K. I. (2010). Direct manipulation blendshapes. IEEE Computer Graphics and Applications, 30(4), 42-50.
[89] Lewis, J. P., Cordner, M., & Fong, N. (2000, July). Pose space deformation: a unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 165-172).
[90] Li J, Daviet G et al (2018) An implicit frictional contact solver for adaptive cloth simulation. ACM Trans. Graph. 37, 4, Article 52 (August 2018), 15 pages.
[91] Li J, Guodong L (2011)” Customizing 3D garments based on volumetric deformation.” Computers in Industry 62.7:693-707.

[92] Li J, Lu G, Liu Z, Liu J and Wang X (2013) Feature curve-net-based three-dimensional garment customization. Textile Research Journal, 83(5), 519,531.
[93] Li J, Ye J, Wang Y, Bai L & Lu G (2010) Fitting 3D garment models onto individual human models. Computers & graphics, 34(6), 742-755.
[94] Li M, Sheffer A, Grinspun E, Vining N (2018) Foldsketch: enriching garments with physically reproducible folds. ACM Trans. Graph. 37, 4, Article 133 (August 2018), 13 pages.
[95] Liao, W., Liu, H., & Li, T. (2017). Interactive shape editing for subdivision surfaces. In Subdivision Surface Modeling Technology (pp. 197-216). Springer, Singapore.
[96] Liu, T., Bargteil, A. W., O'Brien, J. F., & Kavan, L. (2013). Fast simulation of mass-spring systems. ACM Transactions on Graphics (TOG), 32(6), 1-7.
[97] Loop, C. (1987). Smooth subdivision surfaces based on triangles. Master's thesis, University of Utah, Department of Mathematics.
[98] Loper, M., Mahmood, N., Romero, J., Pons-Moll, G., & Black, M. J. (2015). SMPL: A skinned multi-person linear model. ACM transactions on graphics (TOG), 34(6), 1-16.
[99] Macedo I, Joao P G, Luiz V (2011) Hermite radial basis functions implicits. Computer Graphics Forum. Vol. 30. No.1. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
[100] Magnenat-Thalmann, N., Cordier, F., Seo, H., & Papagianakis, G. (2004, November). Modeling of bodies and clothes for virtual environments. In 2004 International Conference on Cyberworlds (pp. 201-208). IEEE.
[101] Magnenat-Thalmann, N., Laperrire, R., & Thalmann, D. (1988). Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping. In In Proceedings on Graphics interface'88.
[102] MakeHuman. Open-source tool for making 3D characters [cited 2020]. Available from: http://www.makehumancommunity.org/
[103] Masuda, H., Yoshioka, Y., & Furukawa, Y. (2007). Preserving form features in interactive mesh deformation. Computer-Aided Design, 39(5), 361-368.
[104] McCormack J, Andrei S (1998)" Creating and rendering convolution surfaces. Computer Graphics Forum. Vol. 17.No. 2. Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishers.
[105] Meng, Y., Wang, C. C., & Jin, X. (2012). Flexible shape control for automatic resizing of apparel products. Computer-Aided Design, 44(1), 68-76
[106] Meyer, M., Desbrun, M., Schröder, P., & Barr, A. H. (2003). Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds. In Visualization and mathematics III (pp. 35-57). Springer, Berlin, Heidelberg.
[107] Miller, G. S. (1988, June). The motion dynamics of snakes and worms. In Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 169-173).
[108] Müller, M., & Chentanez, N. (2010, July). Wrinkle Meshes. In Symposium on Computer Animation (pp. 85-91).
[109] Pasko, G. I., Pasko, A. A., & Kunii, T. L. (2005). Bounded blending for function-based shape modeling. IEEE Computer Graphics & Applications, 25(2), 36-45.
[110] Peng G, Loretta R, David A H, Alexander W, & Michael J B (2012) DRAPE: DRessing Any PErson. ACM Trans.Graph. 31, 4, Article 35 (July 2012), 10 pages.
[111] Piegl, L., & Tiller, W. (2012). The NURBS Book. Springer Science & Business Media.

[112] Pinkall, U., & Polthier, K. (1993). Computing discrete minimal surfaces and their conjugates. Experimental mathematics, 2(1), 15-36.
[113] Pons-Moll, G., Pujades, S., Hu, S., & Black, M. J. (2017). ClothCap: Seamless 4D clothing capture and retargeting. ACM Transactions on Graphics (TOG), 36(4), 1-15.
[114] Popa, T., Zhou, Q., Bradley, D., Kraevoy, V., Fu, H., Sheffer, A., & Heidrich, W. (2009, April). Wrinkling captured garments using space-time data-driven deformation. In Computer Graphics Forum (Vol. 28, No. 2, pp. 427-435). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
[115] Provot, X. (1995, May). Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behaviour. In Graphics interface (pp. 147-147). Canadian Information Processing Society.
[116] Quarteroni, A., Sacco, R., & Saleri, F. (2010). Numerical mathematics (Vol. 37). Springer Science & Business Media.
[117] Rappoport, A., Sheffer, A., & Bercovier, M. (1996). Volume-preserving free-form solids. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2(1), 19-27.
[118] Rhee, T., Lewis, J. P., & Neumann, U. (2006, September). Real-time weighted pose-space deformation on the GPU. In Computer Graphics Forum (Vol. 25, No. 3, pp. 439-448). Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishing, Inc.
[119] Ricci A (1973) A constructive geometry for computer graphics. The Computer Journal, 16(2), 157-160.
[120] Rmillard O, G. Kry P (2013) Embedded thin shells for wrinkle simulation. ACM Trans. Graph. 32, 4, Article 50 (July2013), 8 pages.
[121] Rodriguez, O. (1840). Des lois geometriques qui regissent les desplacements d'un systeme solide dans l'espace et de la variation des coordonnees provenant de deplacements consideres independamment des causes qui peuvent les produire. J Mathematiques Pures Appliquees, 5, 380-440.
[122] Rohmer, D., Popa, T., Cani, M. P., Hahmann, S., & Sheffer, A. (2010). Animation wrinkling: augmenting coarse cloth simulations with realistic-looking wrinkles. ACM Transactions on Graphics (TOG), 29(6), 1-8.
[123] Rose, K., Sheffer, A., Wither, J., Cani, M. P., & Thibert, B. (2007, July). Developable surfaces from arbitrary sketched boundaries. In SGP'07-5th Eurographics Symposium on Geometry Processing (pp. 163-172). Eurographics Association.
[124] Santesteban I, Miguel A O, Dan C (2019) LearningBased Animation of Clothing for Virtual TryOn. Computer Graphics Forum. Vol. 38. No. 2. 2019.
[125] Sederberg, T. W., & Parry, S. R. (1986, August). Free-form deformation of solid geometric models. In Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 151-160).
[126] Shell, M. (2012). Carnegie mellon university motion capture database, (web site 2021) : https://ocap.cs.cmu.edu
[127] Sherstyuk, A. (1998). Convolution surfaces in computer graphics. Monash University.
[128] Shi, G., Gao, C., Wang, D., & Su, Z. (2021). Automatic 3D virtual fitting system based on skeleton driving. The Visual Computer, 37, 1075-1088.
[129] Shi, X., Zhou, K., Tong, Y., Desbrun, M., Bao, H., & Guo, B. (2007). Mesh puppetry: cascading optimization of mesh deformation with inverse kinematics. In ACM SIGGRAPH

2007 papers (pp. 81-es).

[130] Singh, K., & Fiume, E. (1998, July). Wires: a geometric deformation technique. In Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 405-414).

[131] Sloan, P. P. J., Rose III, C. F., & Cohen, M. F. (2001, March). Shape by example. In Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics (pp. 135-143).

[132] Sorkine, O. (2006, December). Differential representations for mesh processing. In Computer Graphics Forum (Vol. 25, No. 4, pp. 789-807). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

[133] Tangled film d'animation de Disney (***Site web 2021***): http://thewaltdisneycompany.com/

[134] The Matlab website. (***Site web 2021***) Available: www.mathworks.com

[135] Thiery, J. M., Guy, É., & Boubekeur, T. (2013). Sphere-meshes: Shape approximation using spherical quadric error metrics. ACM Transactions on Graphics (TOG), 32(6), 1-12.

[136] Thomaszewski, B., Pabst, S., & Strasser, W. (2009, April). Continuum-based strain limiting. In Computer Graphics Forum (Vol. 28, No. 2, pp. 569-576). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

[137] Tisserand Y, Cuel L & Magnenat-Thalmann N (2017) Automatic 3D garment positioning based on surface metric. Comput Anim Virtual Worlds. 28: e1770.

[138] Vaillant, R., Barthe, L., Guennebaud, G., Cani, M. P., Rohmer, D., Wyvill, B., ... & Paulin, M. (2013). Implicit skinning: Real-time skin deformation with contact modeling. ACM Transactions on Graphics (TOG), 32(4), 1-12.

[139] Vaillant, R., Guennebaud, G., Barthe, L., Wyvill, B., & Cani, M. P. (2014). Robust iso-surface tracking for interactive character skinning. ACM Transactions on Graphics (TOG), 33(6), 1-11.

[140] Wang H, Hecht F, Ramamoorthi R, F. OBrien J (2010). Example-based wrinkle synthesis for clothing animation. In ACM SIGGRAPH 2010 papers (SIGGRAPH 10). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 107, 18.

[141] Wang, C. C., & Tang, K. (2004). Achieving developability of a polygonal surface by minimum deformation: a study of global and local optimization approaches. The Visual Computer, 20(8), 521-539.

[142] Wang, C. C., Hui, K. C., & Tong, K. M. (2007). Volume parameterization for design automation of customized freeform products. IEEE transactions on automation science and engineering, 4(1), 11-21.

[143] Wang, X. C., & Phillips, C. (2002, July). Multi-weight enveloping: least-squares approximation techniques for skin animation. In Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation (pp. 129-138).

[144] Weber, O., Sorkine, O., Lipman, Y., & Gotsman, C. (2007, September). Context-aware skeletal shape deformation. In Computer Graphics Forum (Vol. 26, No. 3, pp. 265-274). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

[145] White K B, Cline D, Egbert P K (2007) Poisson Disk Point Sets by Hierarchical Dart Throwing. 2007 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing, Ulm, 2007, pp. 129-132.

[146] Wu N, Deng Z, Huang Y, Liu C, Zhang D & Jin X (2018) A fast garment fitting algorithm using skeleton-based error metric. Comput Anim Virtual Worlds.

[147] Wyvill, G., McPheeters, C. and Wyvill, B. Data structure forsoft objects. The Visual Computer 2, 227–234 (1986).

[148] Xu W, Umentani N, Chao Q, Mao J, Jin X, Tong X (2014) Sensitivity-optimized rigging for example-based real-time clothing synthesis. ACM Trans. Graph. 33, 4, Article 107 (July 2014), 11 pages.

[149] Xu, H., & Barbič, J. (2016). Pose-space subspace dynamics. ACM Transactions on Graphics (TOG), 35(4), 1-14.

[150] Wang, T. Y., Ceylan, D., Popovic, J., & Mitra, N. J. (2018). Learning a shared shape space for multimodal garment design. arXiv preprint arXiv:1806.11335.

[151] Yang, X. S., & Zhang, J. J. (2005, May). Realistic skeleton driven skin deformation. In International Conference on Computational Science and Its Applications (pp. 1109-1118). Springer, Berlin, Heidelberg.

[152] Ye, J., Ma, G., Jiang, L., Chen, L., Li, J., Xiong, G., ... & Tang, M. (2017, October). A unified cloth untangling framework through discrete collision detection. In Computer Graphics Forum (Vol. 36, No. 7, pp. 217-228).

[153] Yvart, A., Hahmann, S., & Bonneau, G. P. (2005). Hierarchical triangular splines. ACM Transactions on Graphics (TOG), 24(4), 1374-1391.

[154] Zanni, C., Bernhardt, A., Quiblier, M., & Cani, M. P. (2013). Surfaces Implicites Homothétiques. In Revue Electronique Francophone d'Informatique Graphique (Vol. 7, No. 1, pp. 41-52).

[155] Zhang D & Yuen M M (2000). Collision detection for clothed human animation. In Proceedings the Eighth Paciffic Conference on Computer Graphics and Applications (pp. 328-337). IEEE.

[156] Zhong, Y., & Xu, B. (2009). Three-dimensional garment dressing simulation. Textile Research Journal, 79(9), 792-803.

[157] Zhong Y. Q. (2008) Fast virtual garment dressing on posed human model. Journal of Fiber Bioengineering and Informatics, 1(1), 21-28.

[158] Zhou, K., Huang, J., Snyder, J., Liu, X., Bao, H., Guo, B., & Shum, H. Y. (2005). Large mesh deformation using the volumetric graph laplacian. In ACM SIGGRAPH 2005 Papers (pp. 496-503).

[159] Zorin, D. (2000). Subdivision for modeling and animation. SIGGRAPH2000 course notes.

[160] Zurdo, J. S., Brito, J. P., & Otaduy, M. A. (2012). Animating wrinkles by example on non-skinned cloth. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 19(1), 149-158.

[161] Ait Mouhou, A., Saaidi, A., Ben Yakhlef, M., & Abbad, K. (2021). 3D garment positioning using Hermite radial basis functions. Virtual Reality, 1-28.

Annexe A

Etude analytique des approches d'augmentation des plis sur un maillage de vêtement.

Nous présentons dans cette annexe une étude analytique des travaux dernièrement publiés dans le cadre des deux sous-catégories d'approches d'augmentation des plis [1]. Cette étude a pour objectif d'évaluer la capacité de chacune de ces approches à générer les plis sur des vêtements portés par des personnages virtuels ainsi que la mise en relief de leurs avantages et de leurs inconvénients.

A.1. Approches d'augmentation de plis

Dans cette partie, nous présentons les approches récemment proposées, dans le cadre des deux sous-catégories d'approches d'augmentation des plis.

A.1.1. Approches géométriques

Le principe de fonctionnement de cette catégorie d'approche est résumé sur la figure A.1.

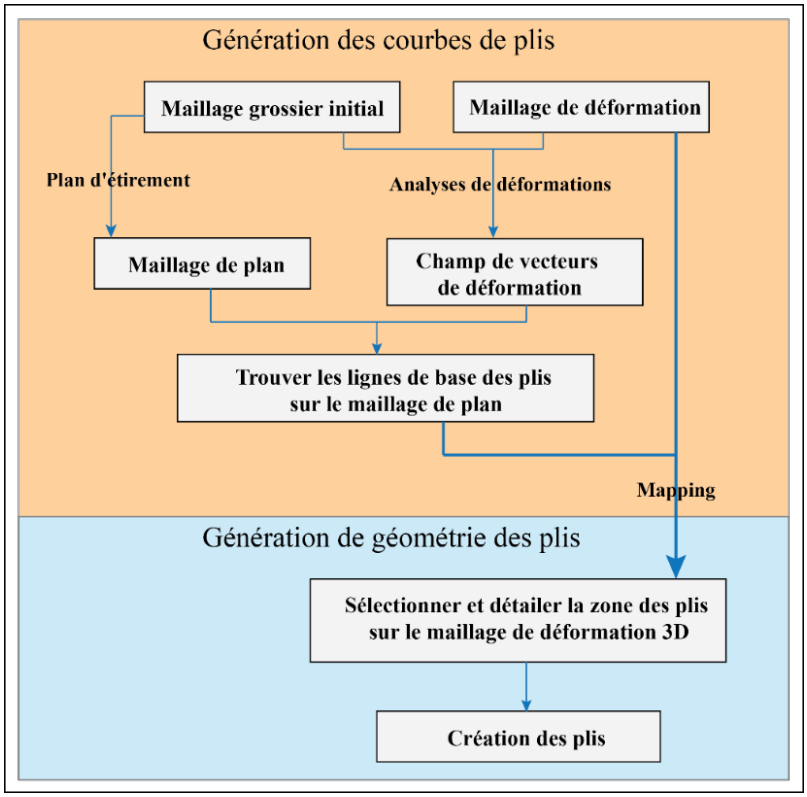


Figure A.1 : Principe de fonctionnement des méthodes d'augmentation géométrique.

Le tableau A.1, regroupe les modèles et les techniques d'augmentation géométrique, examinées dans ce travail.

Référence	Paramètres d'entrées	Étapes de modélisation et d'animation
Cutler et al. [49]	▪ Maillage de référence ▪ 10 à 12 poses de référence	1- Générer les courbes de plis manuellement avec un outil interactif 2- Convertir chaque courbe de plis en un ensemble de forces de déplacement qui agissent sur les points de surface du maillage. 3- Calculer les déformations des plis pour chaque trame sur une pose d'animation arbitraire.
Rohmer et al. [122]	▪ Maillage de référence ▪ Animation de vêtements lisse	1- Calculer le champ tensoriel lisse [Talpaert 2013], entre les trames d'animations et un maillage du vêtement comme référence. 2- Tracer les courbes de plis sur le maillage dans les zones qui présentent une compression élevée selon les résultats de l'étape précédente. 3- Générer la géométrie des plis en utilisant un déformeur implicite en squelette qui prend les courbes des plis comme squelette.
Gillette et al. [51]	▪ Maillage de référence	1- Construire un maillage triangulaire de référence pour chaque trame d'animation. 2- Calculer le champ tensoriel lisse entre chaque trame d'animations et le maillage de référence de la trame précédente. 3- Déterminer les patterns de mouvement sur la surface par une technique de *graph-cut* [Boykov 2001]. 4- Utiliser l'unité de tessellation GPU pour générer la géométrie des plis suivant les patterns de l'étape 3.

Tableau A.1 : Approches d'augmentations géométriques examinées dans cette étude.

A.1.2. Approches guidées par base de données (data-driven)

Une large gamme des méthodes d'augmentation de plis par base de données, ajout des plis au maillage de tissu en utilisant des informations obtenues à partir d'une base de données statique qui contient des simulations des échantillons de plis [140]. La figue A.2 ci-dessous, présente le principe de fonctionnement de cette catégorie d'approche.

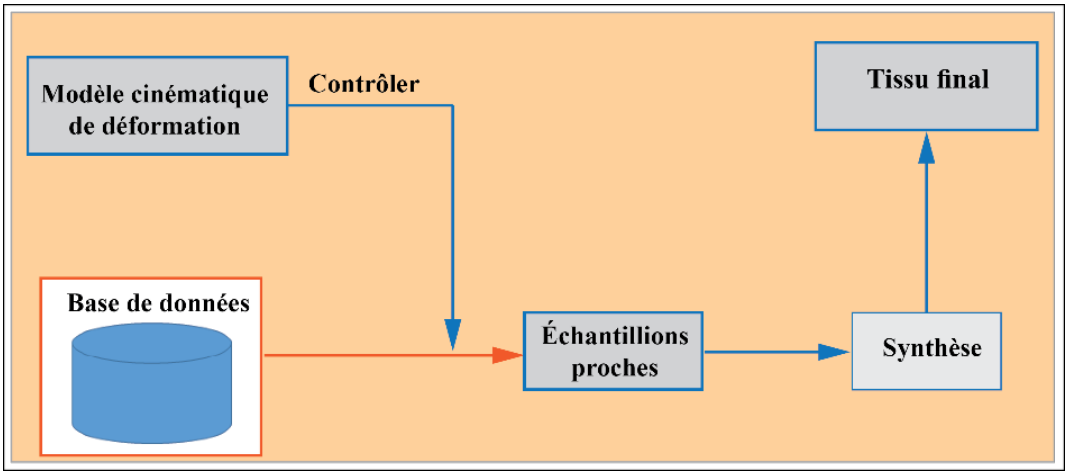


Figure A.2 : Principe de fonctionnement des méthodes *data-driven*.

Dans le tableau A.2 (ci-dessous), nous avons exposé les récentes approches proposées en *data-driven*. Selon les critères de paramètres d'entrée, technique de simulation utilisée pour construire la base de données et les étapes de modélisation et d'animation des plis pour chaque approche.

Référence	Paramètres d'entrées	Techniques de simulation des échantillons	Étapes de modélisation et animation
Wang et al. [140]	▪ Pose du caractère ▪ Maillage grossier du tissu.	Simulation multi-résolution	1. Prendre comme données d'entrée l'articulation du caractère humain. 2. Chercher les maillages de plis correspond à cette articulation dans la base de données précalculée. 3. Fusionner les maillages pour toutes les articulations en un seul maillage. 4. Transférer les détails des plis vers le maillage grossier du tissu.
Zurdo et al [160]	▪ Maillage caractéristique ▪ Nombre de fois de subdivision	Simulation multi-résolution + Déformation à base d'espace de pose	1. Simuler le tissu à faible résolution, défini par le maillage caractéristique. 2. Subdiviser le maillage à faible résolution pour obtenir le maillage lisse. 3. Appliquer le calcul des plis à base des échantillons pour obtenir le maillage détaillé.

Hahn et al. [59]	▪ Squelette rigide ▪ Maillage de surface non déformée ▪ Séquences d'animation	Simulation sous-espace	1. Rechercher dans la base de données, les vecteurs d'échantillon proche de la pose actuelle. 2. Sélectionner un ensemble de vecteurs depuis le groupe de base candidats de l'étape (1). 3. Effectuer la simulation en sous-espace en utilisant l'ensemble de vecteurs sélectionnées.
Xu et al. [148]	▪ Maillage du corps ▪ Maillage de vêtement ▪ Squelette articulé	Analyse de sensibilité	1. Chercher les poses d'échantillon les plus proches de la pose d'entrée. 2. Appliquer le schéma de rigging optimisé par sensibilité sur les échantillons récupérés. 3. Mélanger les déformations pour synthétiser le maillage intermédiaire. 4. Résoudre les pénétrations et ajouter les effets dynamiques et l'amortissement.

Tableau A.2 : Approches d'augmentations *data-driven* examinées dans cette étude.

A.2. Résultats de l'étude analytique

Cette étude analytique est fondée principalement sur les résultats obtenus de notre implémentation de quelques approches parmi les deux catégories. Ainsi sur les résultats des expériences publiées dans les articles des approches, et les démonstrations de simulation enregistrées dans les vidéos associées à chaque article.

A.2.1. Analyse de déformation

Dans cette partie, nous allons comparer les deux catégories d'approches d'augmentation au niveau de la capacité à simuler les plis quelle que soit la cause de déformation de tissu.

A.2.1.1. Augmentation géométrique

La méthode de [49] permet de concevoir les courbes de plis à l'aide d'un système basé sur un certain nombre de positions clés dessinées par un artiste. Dans les méthodes de [122, 51] l'analyse de déformation est effectuée par un calcul du champ tensoriel du maillage déformé par rapport à un maillage de référence (voir figure A.3).

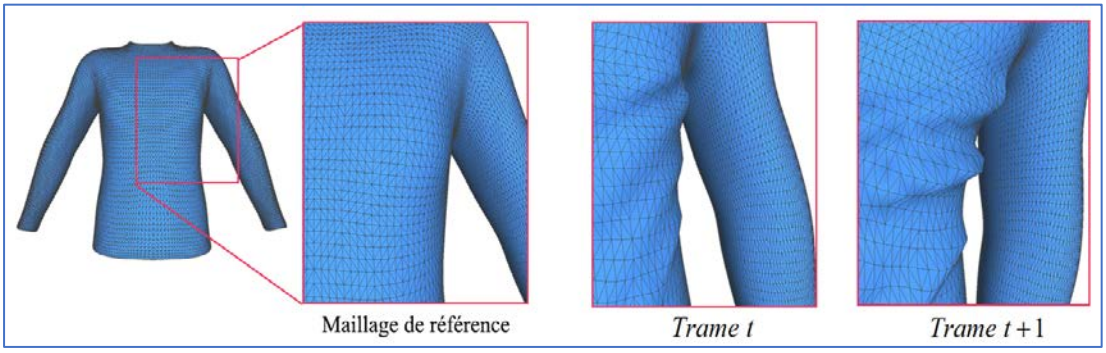


Figure A.3 : Le calcul de champ de tenseurs d'élongation utilise le même maillage de référence pour tous les trames d'animation.

A.2.1.2. Approches en data-driven

Les simulations en bas de la figure A.4, sont les résultats que nous avons obtenus à la fin de l'opération d'ajout des plis [59]. D'après ces simulations on remarque que le système étudié a réussi à affecter l'échantillon à son os correspond dans la déformation seulement pour deux poses d'animation parmi les trois poses traitées.

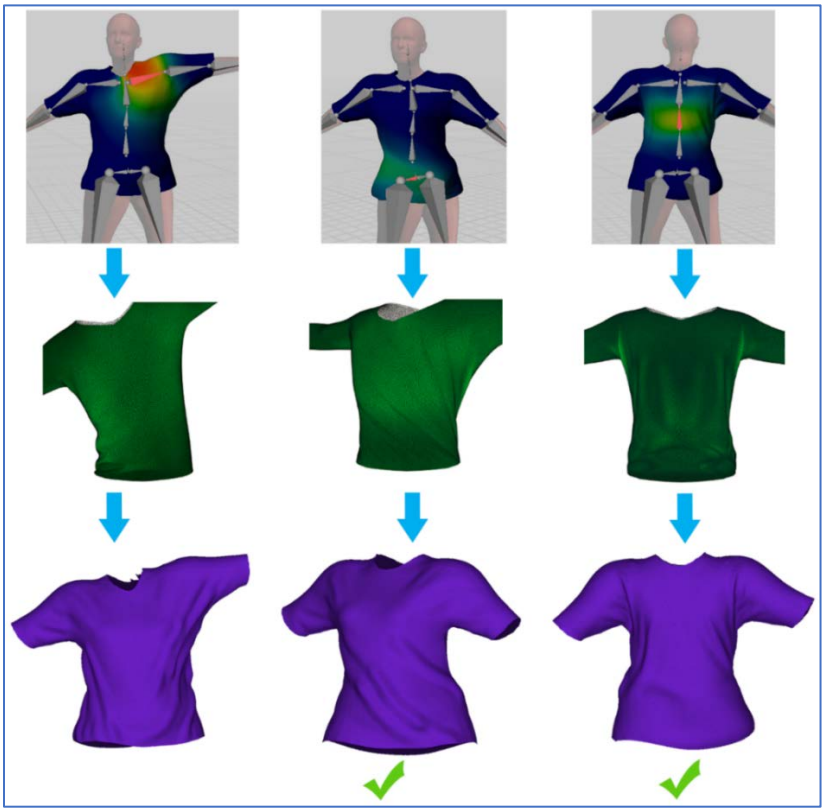


Figure A.4 : les plis générés par la méthode de [59] pour trois poses d'animation. (En haut) l'influence de l'os sur la partie. (Au centre) l'échantillon correspond à l'os dans la base des plis de [59]. (En bas) le résultat de simulation obtenu.

A.2.1.3. Comparaison au niveau d'analyse de déformation

Le tableau A.3 présente un résumé de la comparaison entre les approches au niveau de la modélisation des plis de compression ou d'étirement

Catégories	Approche (Auteur)	Modèle de détection de déformation	Type de déformation	Nature de vêtement
Géométriques	[49]	_	_	Serré
	[122]	Tenseurs d'élongation	Compression	Serré Bouffant
	[51]	Tenseurs d'élongation	Compression	Serré Bouffant
Data-driven	[140]	Squelette articulé	Compression	Serré
	[160]	Déformation Pose-Espace pondérée (WPSD)	Compression Étirement	Serré Bouffant
	[59]	Modèle de déformation cinématique (LBS)	Compression Étirement	Serré
	[148]	Squelette articulé	Compression	Serré

Tableau A.3 : Comparaison des techniques en termes de modèle de détection de déformation utilisé, type de déformation détectée, les vêtements supportés.

A.2.2. Forme des plis générés

D'une manière générale la forme des plis, c'est-à-dire leur largeur et leur profondeur, reflète à la fois la quantité de déformation appliquée sur la surface, l'épaisseur du tissu ainsi que sa structure interne.

A.2.2.1. Forme des plis des approches géométriques

Afin de contrôler l'apparence de la forme des plis, les méthodes de [122] et [51] représentent les plis comme un contour de cercle décalé par rapport à la surface du maillage, en définissant deux paramètres affectant leur largeur et leur profondeur.

La figure A.6 illustre les résultats obtenus avec différents paramètres de forme des plis [122]. Bien que l'utilisation d'arcs circulaires pour représenter les plis soit un choix adapté pour l'estimation de leur hauteur et leur largeur, les profils de plis réels s'écartent de cette forme. En effet les plis réels des vêtements se fondent en douceur avec la surface environnante de tissu.

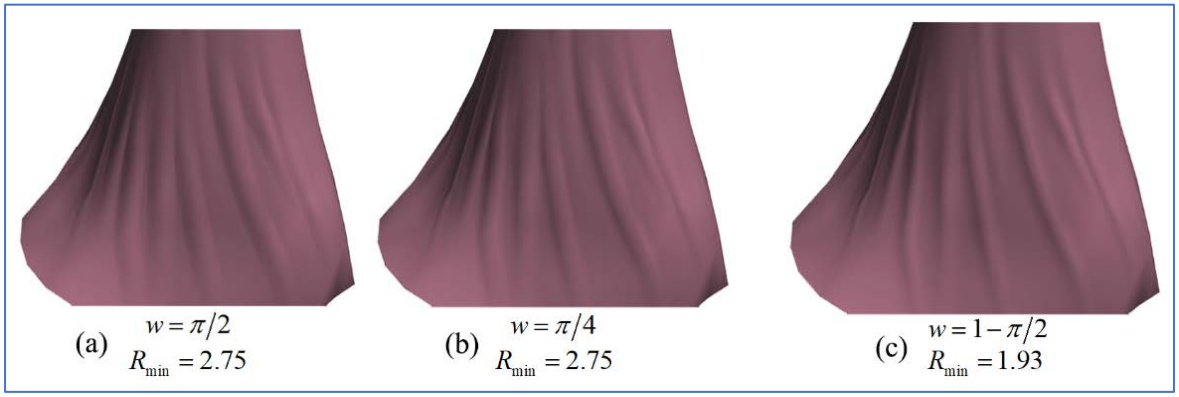


Figure A.6 : Résultats d'application de la méthode de [122] sur un modèle de jupe déformée. (a) et (b) déférentes largeurs d'arc de plis. (c) augmenter la résistance de tissu aux plis avec un arc semi-circulaire.

A.2.2.2. Forme des plis des approches en data-driven

Nous avons examiné la méthode de [59], en l'appliquant sur un modèle de t-shirt. Nous avons utilisé la même base des plis utilisé dans l'implémentation de [59]. La figure A.7 illustre les résultats de simulation. D'après les résultats de la simulation, on peut noter que les plis générés suivent une organisation parallèle, et ils ont presque la même forme.

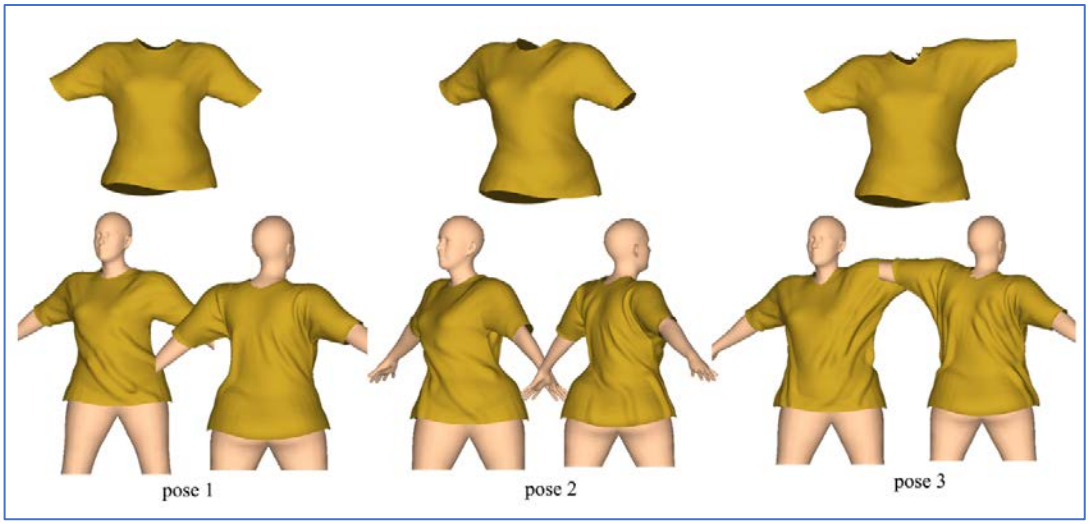


Figure A.7 : Résultat de simulation avec la méthode [59] de sur un modèle de T-shirt. (En haut) la déformation de modèle. (En bas) le résultat d'ajout de plis.

A.2.2.3. Comparaison au niveau de la forme des plis

D'après l'étude et les expérimentations que nous avons effectués sur les deux catégories d'approche d'augmentation de plis, nous pouvons conclure que :

- La méthode géométrique offre à l'artiste la possibilité de contrôler la hauteur et la densité des plis à l'aide d'un ensemble de paramètres d'entrée. Cependant, les plis générés ont

une forme généralement circulaire, ce qui loin de la forme réelle des plis (forme proche des B-spline quadratique).

– Les méthodes à base de données ne possèdent pas ce mécanisme qui permet de gérer les paramètres de la forme des plis. Leurs résultats dépendent des échantillons de plis stockés dans la base. Par conséquent, le contrôle direct de l'utilisateur semble impossible ; ainsi les caractéristiques naturelles de longueur, et largeur, dépendent forcément de l'étape de création de la base de plis.

A.2.3. Persistance temporelle

Dans ce paragraphe, nous allons montrer les méthodes proposées dans chaque approche dans le but de simuler la persistance temporelle des plis.

A.2.3.1. Persistance par approches géométriques

Les propositions de [122] et [51] détectent la déformation de la surface de tissu en chaque trame d'animation, par l'utilisation du calcul de tenseurs d'élongation entre le maillage déformé et le maillage de référence. Suite à cette étude, nous avons résumé les étapes de ce principe pour toute trame comme suit.

1. Déplacer les points générateurs en fonction des nouvelles valeurs de champs de tenseurs.
2. Propager les nouvelles courbes de plis suivant la compression des triangles du maillage.
3. Optimiser globalement les courbes tracés.

La figure A.8 présente le résultat de simulation de trois trames d'animation successive.

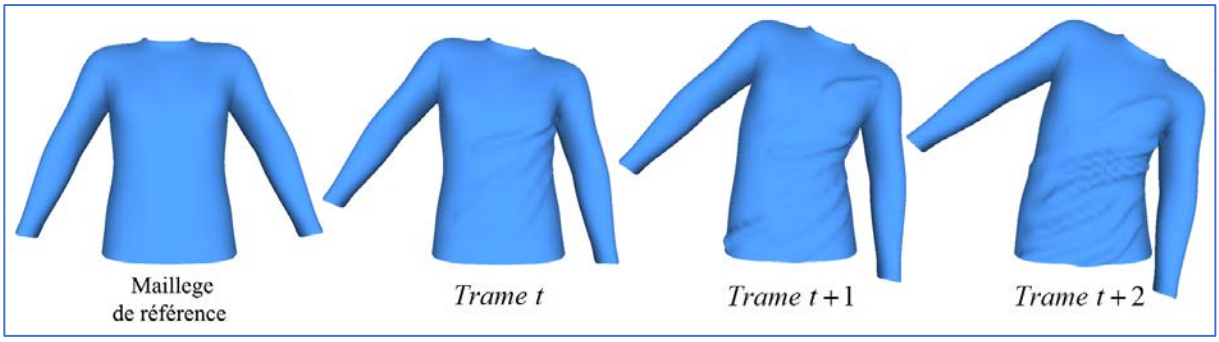


Figure A.8 : Résultats d'application de la méthode de [122] sur un modèle de t-shirt en animation.

A.2.3.2. Persistance par approches data-driven

Les méthodes de *data-driven* reposent principalement sur un modèle d'interpolation linéaire qui prend en considération la distribution des poids des articulations sur la surface de tissu et la position de l'articulation. La figure A.9 ci-dessous, présente les résultats de la simulation issus de la proposition de [140]. Ces résultats montrent que la forme finale d'un maillage de tissu, après l'utilisation de cette méthode Wang et al. [140], dépond des échantillons stockés dans la base.

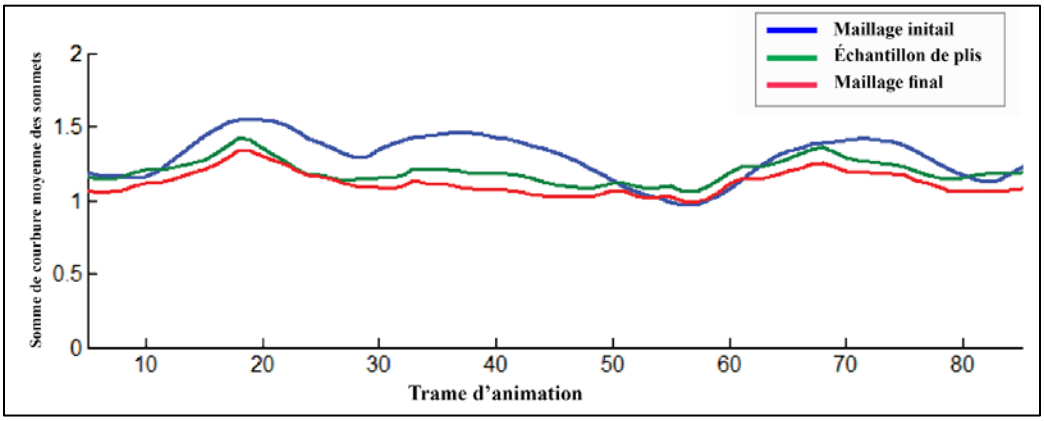


Figure A.9 : Comparaison de la somme de courbure moyenne des sommets sur 80 trames [140] pour le maillage d'entrée (bleu), maillage de base de plis(vert) et maillage final(rouge).

A.2.3.3. Comparaison au niveau de la persistance

Le tableau A.4, rassemble les avantages et les inconvénients des deux sous-catégories d'approches d'augmentation de plis au niveau de la persistance de plis.

Catégorie	Avantages	Inconvénients
Géométriques	▪ Plis synchronisent avec le mouvement de tissu	▪ Les plis apparaissent et disparaissent brusquement ▪ Le processus de glissement très sensible au changement de tenseurs d'élongation ▪ Absence de détails statiques sur le tissu
Data-driven	▪ Présence de détails statiques sur le tissu	▪ Déformation de frictions internes du tissu non-détectée ▪ Déformation de frictions entre les vêtements et la surface du corps non détecté ▪ La qualité des résultats dépend de la taille de base de données

Tableau A.4 : Avantages et Inconvénients des deux sous-catégories au niveau de la persistance des plis.

A.2.4. Parallélisme et performance en temps d'exécution

Le tableau A.5 présente un résumé de l'étude au niveau de l'aspect général des plis générés, la capacité d'implémentation en GPU et le temps moyenne d'exécution de l'approche.

Catégorie	Approche	Plis statiques	Plis dynamiques	Utilisation de GPU	Vitesse moyenne d'exécution (FPS)
Géométriques	[49]		✓		0.7 à 1.7
	[122]		✓		5 à 10
	[51]		✓	✓	60
Data-driven	[140]	✓			12
	[160]	✓		✓	125
	[59]		✓		17
	[148]	✓		✓	20

Tableau A.5 : Comparaison des techniques en termes de types de plis générés, implémentation en GPU et vitesse moyenne d'exécution.

A.3. Conclusion

Suite à l'étude analytique présentée dans cette annexe, nous avons conclu que la force des méthodes géométriques réside dans leur capacité de manipulation directe du maillage de tissu, et que la force des méthodes à base de données se situe dans l'utilisation des modèles de déformation liés au corps, pour guider le processus de récupération des déformations de plis, depuis la base.

Annexe B

Algorithme d'enrobage par mélange linéaire (Linear Blend Skinning)

Dans le skinning par mélange linéaire (LBS), l'opération de base consiste à déformer la peau selon une liste donnée de transformations osseuses (Fig. 3.2). La formulation du modèle LBS nécessite les données d'entrée suivantes :

- **Maillage de surface** : un modèle 3D représenté sous forme du maillage polygonal, où seules les positions des sommets changeront lors des déformations. Nous désignons les autres sommets de pose par $v_i ..., v_n$ et $v_i \in \mathbb{R}^4$ sont donnés en coordonnées homogènes.
- **Transformations de squelette** : représentant la déformation courante à l'aide d'une liste de matrices $T_i ..., T_m \in \mathbb{R}^{4\times4}$. Les matrices peuvent être définies de manière pratique à l'aide d'un squelette animé. Avec T_j est la matrice de transformation associée à l'os j dans sa pose actuelle (déformée), R_j^{-1} est la transformation inverse du même os dans la pose de repos R. De plus, la matrice R reste constante, donc son inverse est également constant et peut être précalculé en toute sécurité. Chaque transformation de squelette influence une partie du maillage.
- **Poids de skinning**: Pour chaque sommet v_i, nous avons des poids $w_{i,1} + ... + w_{i,m} \in \mathbb{R}$, dans lesquels chaque $w_{i,j}$ décrit le degré d'influence de l'os j sur le sommet v_i. Les poids de liaison sont normalement supposés être convexes, donc $w_{i,1} + ... + w_{i,m} = 1$ et $w_{i,j} \geq 0$.

Le maillage de surface est manipulé à l'aide de squelette. Chaque sommet est associé aux os via un poids de liaison, qui quantifie l'influence de chaque os sur les sommets. Par conséquent, l'idée de base derrière LBS est de mélanger linéairement les matrices de transformation. La peau est déformée en transformant chaque sommet par une combinaison pondérée de transformations de squelette dans la pose de repos. Ainsi, la position finale du sommet transformée v_i' est une moyenne pondérée de sa position initiale transformée par chacun des os associés au sommet. L'ensemble du processus peut être exprimé avec l'équation suivante.

$$v_i' = \sum_{j=1}^{m} w_{i,j} T_j R_j^{-1} v_i \qquad \text{(A.1)}$$

Techniquement, l'implémentation d'un algorithme de skinning par mélange linéaire est simple et un pseudo-code est présenté dans Algorithme B.1. Le skinning de mélange linéaire fonctionne très bien lorsque les transformations mélangées T_j ne sont pas très différentes. Des problèmes

surviennent si nous devons mélanger des transformations, qui diffèrent considérablement dans leurs composants de rotation.

Algorithme B.1 : Pseudo-code simple de l'algorithme de skinning par mélange linéaire

Entrée : *Vecteur sommets*, *Matrices 4x4 transformationSqueletteCurrent*, *Matrices 4x4 transformationSqueletteInitial*, *Matrices 4x4 poidsSkinning*

Sortie : *Vecteur sommetsDéformés*

1. *// Appliquer l'animation actuelle (transformation de squelette) à la pose initiale pour obtenir la // matrices de skinning.*
2. **Pour tout** *os* j **dans** *Squelette* **faire**
3. $matriceSkinning_j =$ $transformationSqueletteCurrent \times transformationSqueletteInitial_j^{-1}$
4. **Fin pour**
5. *// Boucler sur chaque sommet et calculer la position fusionnée*
6. **Pour tout** v_i **dans** *sommet* **faire**
7. $sommetsDéformés_i = sommets_i + poidsSkinning_{i,j} \times matriceSkinning_j$
8. **Fin pour**

Annexe C

Enrobage par quaternions doubles (Dual Quaternions Skinning)

C.1. Quaternions

Les quaternions satisfont le besoin de méthodes complètes de représentation de l'orientation et offrent des avantages significatifs par rapport à la manière traditionnelle d'utiliser les angles d'Euler pour définir les orientations. De plus, les quaternions sont extrêmement utiles pour interpoler entre les orientations dans l'espace 3D. L'utilisation la plus répandue des quaternions à ce jour est dans l'animation par ordinateur. Ils sont utilisés pour représenter les transformations de l'orientation des objets graphiques.

La construction des quaternions est basée sur la théorie des nombres complexes. Un quaternion est défini comme :

$$q = w + \left(xi + yj + zk\right) \quad \text{(B.1)}$$

Avec w, x, y, z sont des nombres réels et i, j, k sont les composants imaginaires. Les composants imaginaires satisfont $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$, et ils ne sont pas communicatives. Le composant w est également connu comme la partie scalaire d'un quaternion, et x, y, z sont également connus sous le nom de partie vectorielle. Il est plus courant en infographie de représenter un quaternion comme ces deux composants :

$$q = \left(w, v\right) \quad \text{(B.2)}$$

Les opérations arithmétiques élémentaires des quaternions peuvent donc s'exprimer avec ces représentations comme ci-dessous :

- Multiplication scalaire :

$$sq = \left(sw, sv\right) \quad \text{(B.3)}$$

Avec s est un paramètre scalaire

- L'addition :

$$q_1 + q_2 = \left(w_1 + w_2, v_1 + v_2\right) \quad \text{(B.4)}$$

- La multiplication, est définie par le produit Hamilton :

$$q_1 q_2 = \left(w_1 w_2 - v_1.v_2, w_1 v_2 + w_2 v_1 + \left(v_1 \times v_2\right)\right) \quad \text{(B.5)}$$

- Conjugué :

$$q^* = \left(w, -v\right) \quad \text{(B.6)}$$

- Ordre de grandeur :

$$\|q\| = \sqrt{qq^*} \quad \text{(B.7)}$$

Dans une rotation 3D, les transformations correspondent généralement à des quaternions unitaires. Le quaternion unitaire est un quaternion dont la longueur est égale à 1, qui peut être calculée en divisant chacune de ses composantes par la grandeur. La composante scalaire du quaternion unitaire représente la quantité de rotation qui se produira, et la partie vectorielle représente l'axe autour de la rotation.

C.2. Dual quaternions

Les quaternions doubles étendent les quaternions avec la théorie des nombres doubles introduite par [Clifford 1882]. Les nombres doubles se composent de deux éléments :

$$z = r + \varepsilon d \quad \text{(B.8)}$$

Avec l'élément ε est l'opérateur double avec $\varepsilon^2 = 0$ et $\varepsilon \neq 0$, r est la partie réelle (ou partie non-double) et d est la partie double.

Un quaternion dual a d'abord été présenté comme une algèbre de Clifford composée de deux quaternions [Clifford 1882], qui a non seulement une arithmétique élémentaire similaire aux quaternions qui représentent des rotations, mais il inclut également des informations sur la translation. Chaque quaternion dual se compose de deux quaternions, et ils sont distingués comme la partie réelle et la partie double selon la théorie des nombres double. Soient q_r la partie réelle et q_d la partie double, alors un quaternion double $\hat{q}$ est défini comme suit :

$$\hat{q} = q_r + q_d\varepsilon = \left(r_w, r_x, r_y, r_z\right) + \left(d_w, d_x, d_y, d_z\right)\varepsilon \quad \text{(B.9)}$$

Avec q_d est l'unité double, $\left(r_w, r_x, r_y, r_z\right)$ et $\left(d_w, d_x, d_y, d_z\right)$ sont respectivement la représentation en quaternion de la partie réelle et de la partie double.

Les opérations arithmétiques élémentaires des quaternions doubles peuvent donc s'exprimer avec ces représentations comme ci-dessous :

- Multiplication scalaire :

$$s\hat{q} = sq_r + sq_d\varepsilon \quad \text{(B.10)}$$

Avec s est un paramètre scalaire

- L'addition :

$$\hat{q}_1 + \hat{q}_2 = q_{r_1} + q_{r_2} + \left(q_{d_1} + q_{d_2}\right)\varepsilon \quad \text{(B.11)}$$

- La multiplication :

$$\hat{q}_1\hat{q}_2 = q_{r_1}q_{r_2} + \left(q_{r_1}q_{d_2} + q_{d_1}q_{r_2}\right)\varepsilon \quad \text{(B.12)}$$

- Conjugué :

$$\hat{q}^* = q_r^* + q_d^*\varepsilon \quad \text{(B.13)}$$

- Ordre de grandeur :

$$\left\|\hat{q}\right\| = \sqrt{\hat{q}\hat{q}^*} \qquad \text{(B.14)}$$

Les quaternions doubles unitaires peuvent également représenter des transformations 3D. Les transformations utilisant des quaternions doubles unitaires sont données comme suit :

$$p' = \hat{q}p\hat{q}^* \qquad \text{(B.15)}$$

Avec p et p' représentent le point de transformation dans l'espace 3D intégré dans un quaternion unitaire, et $\left(\hat{q},\hat{q}^*\right)$ représentent un quaternion dual et son conjugué.

Les informations de rotation d'un quaternion double unitaire correspondent au quaternion de partie réelle q_r et le quaternion de partie double q_d représente les informations de translation. Étant donné un vecteur de translation $\vec{t} = \left(t_0, t_1, t_2\right)$ dans un espace tridimensionnel, les informations de translation sous la forme d'un quaternion unitaire sont données comme suit :

$$q_d = \left(0, \frac{t_0}{2}, \frac{t_1}{2}, \frac{t_2}{2}\right) \qquad \text{(B.16)}$$

Ainsi, une unité de quaternion double $\hat{q}$ sans rotation est représenté comme suit :

$$\hat{q} = \left(1,0,0,0, \frac{t_0}{2}, \frac{t_1}{2}, \frac{t_2}{2}\right) \qquad \text{(B.17)}$$

Rappelant la forme matricielle des quaternions unitaires, la forme matricielle d'un quaternion double unitaire est essentiellement un composé de la matrice de rotation qui correspond au quaternion unitaire de la partie réelle et au vecteur de translation. La forme de matrice de transformation homogène des quaternions doubles est donnée par :

$$\begin{bmatrix} r_w^2 + r_x^2 - r_y^2 - r_z^2 & 2r_x r_y - 2r_w r_z & 2r_x r_z + 2r_w r_y & t_0 \\ 2r_x r_y + 2r_w r_z & r_w^2 - r_x^2 + r_y^2 - r_z^2 & 2r_y r_z - 2r_w r_x & t_1 \\ 2r_x r_z - 2r_w r_y & 2r_y r_z + 2r_w r_y & r_w^2 - r_x^2 - r_y^2 + r_z^2 & t_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{(B.18)}$$

Publications

Articles publiés dans des journaux internationaux

1) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. "*3D garment positioning using Hermite radial basis functions.* " **Virtual Reality (Springer), 1-28.** DOI: https://doi.org/10.1007/s10055-021-00566-7
Facteur d'impact Scopus : 7.5 (2020)

2) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. " *Wrinkle synthesis for cloth mesh with hermite radial basis functions*". **Multimedia Tools and Applications (springer)**, 80(1), 1583-1610. August 2020, DOI : https://doi.org/10.1007/s11042-020-09743-3.
Facteur d'impact Scopus : 4.6 (2020)

3) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. *"Virtual Hand Skinning Using Volumetric Shape"*. **International Journal of Computer Aided Engineering and Technology (Inderscience)** 2020 En cours de publication.
Facteur d'impact dans Scopus : 0.6 (2020)

4) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. "*Analytical View of Augmenting Coarse Cloth Simulations with Wrinkles*" **Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer), vol 756.** May 2018
DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-319-91337-7_44
Facteur d'impact dans Scopus : 0.9 (2019)

Communications

1) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. "*Augmenting coarse Cloth simulation with Wrinkles: Comparative study*" **The second International Conference on Real-Time Intelligent Systemes (RTIS 2017).** 18-20 octobre 2017
   Bibliothèque universitaire Mohamed Sekkat, Université Hassan II, Casablanca, Maroc.

2) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. "*A study and implementation of the hand deformation using implicit skinning*" **International Conference on Intelligent Systems and Advanced Computing Sciences (ISACS) (pp. 1-7). IEEE.** 26-27 Décembre 2019
   Faculté Polydisciplinaire de Taza, Université Sidi Mohamed Ben Abdallah, Fès, Maroc.
   DOI : https://doi.org/10.1109/ISACS48493.2019.9068914

3) Abderrazzak Ait Mouhou, Abderrahim Saaidi, Majid Ben Yakhlef, Khalid Abbad. " *Cloth Fitting Based on Skeleton Driving and Implicit Skinning*". **2020 8th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM) (pp. 1-5). IEEE.** 28-29 Octobre 2020 (Virtual).
   Université de Reims Champagne-Ardenne Reims, France.
   DOI : https://doi.org/10.1109/WINCOM50532.2020.9272498