

Déformation de la peau d'un personnage avec prise en compte des contacts

Rodolphe Vaillant^{1,5}, Loïc Barthe¹, Gaël Guennebaud², Marie-Paule Cani³, Damien Rohmer⁴ et Brian Wyvill⁵

¹IRIT - Université de Toulouse, ²INRIA Bordeaux, ³LJK - Grenoble Universités - INRIA, ⁴CPE Lyon - INRIA, ⁵University of Victoria (Canada)

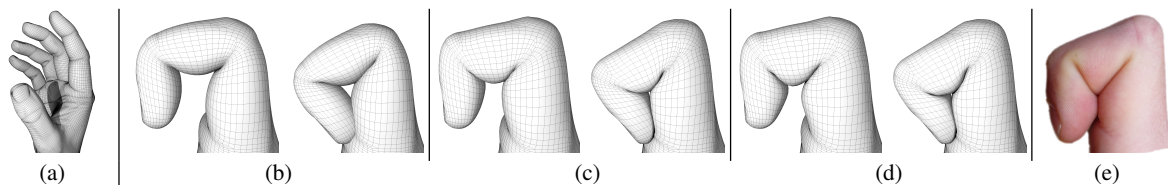


Figure 1: (a) Modèle d'une main dont l'index est animé par la suite. (b) Animation à 500 images par secondes (fps) avec le LBS (linear blending skinning). (c) Notre méthode à 95 fps compense la perte de volume de l'articulation et modélise le contact. (d) Une variante de notre approche à 82 fps mimant le gonflement de la peau. (e) L'image réelle d'un doigt.

Résumé

Lors de l'animation d'un maillage représentant la peau d'un personnage ou d'un animal par exemple, des techniques dites de skinning sont utilisées pour le déformer au niveau des articulations. Bien que très populaires dans l'industrie pour leur très faible coût d'évaluation, les techniques de skinning géométrique comme le LBS (Linear Blending Skinning) ou les dual quaternions, ne permettent pas d'imiter de façon crédible les déformations des membres. Pour mieux capturer le comportement de la peau, d'autres méthodes basées seulement sur le maillage, utilisent des calculs coûteux comme la détection de collisions ou la correction de volume. Toutefois ces approches restent seulement adaptées au rendu hors ligne. Nous présentons la première méthode temps réel produisant une déformation du maillage en prenant en compte le contact de la peau et, éventuellement, le gonflement des muscles. Nous proposons d'utiliser de façon conjointe le maillage et une représentation volumique. Le maillage est approximé avec une surface implicite qui nous permet de le déformer de façon plausible tout en traitant les collisions et en conservant les détails du maillage.

Mots clé : Skinning, Déformation de maillage avec contact, fonction potentiel, surface implicite

1. Introduction

L'un des principaux défis lors de l'animation de personnages virtuels est le calcul d'une déformation crédible de la peau au niveau des articulations (Figure 1). La phase de production d'une telle déformation est usuellement appelée *skinning*. Les méthodes les plus populaires comme le Linear Blending Skinning (LBS) et les dual quaternions [MTLT88, KCvO08] font partie de la famille du skinning géométrique. Elles offrent à l'artiste une interaction en temps réel avec le modèle 3D et ne nécessitent que peu

d'entrées utilisateur. Cela se vérifie, entre autres, avec les techniques d'association automatique du squelette d'animation avec un maillage [BP07, JBPS11, BTST11]. Toutefois, les déformations résultantes ne maintiennent pas un volume constant et peuvent causer des auto-intersections locales. Ainsi ces approches ne parviennent pas à réaliser des déformations organiques convaincantes (Figure 1(b)).

Des méthodes basées sur l'exemple [MG03] et l'interpolation de formes [LCF00] ont été proposées pour atteindre plus de réalisme en gardant une animation en temps réel. Cependant elles requièrent une quantité d'entrées plus importante et un travail plus fastidieux de la part de l'artiste. De plus, elles restent limitées dans le type de déformations

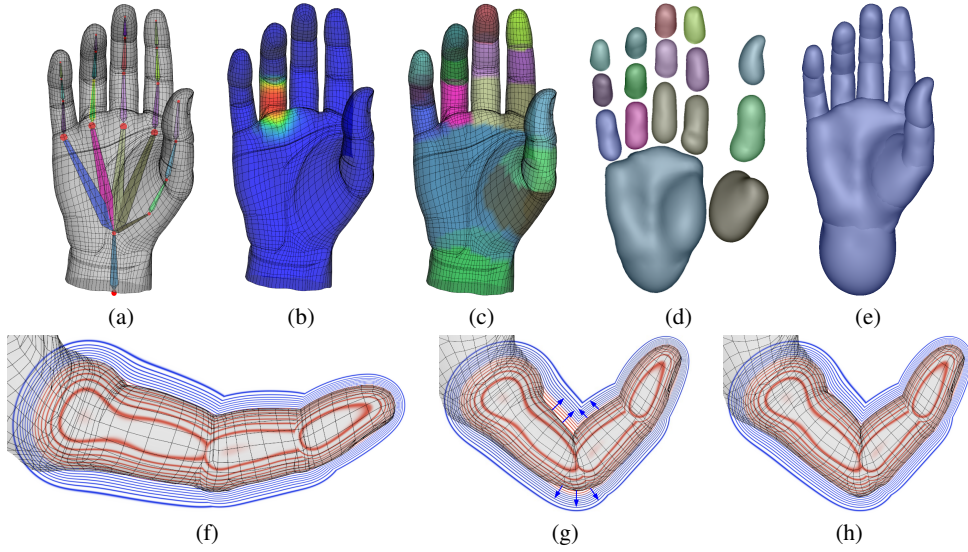


Figure 2: **Vue d'ensemble.** (a) Un maillage avec son squelette d'animation, (b) les poids de déformation du skinning pour un des os, et (c) la segmentation du maillage. (d) Les surfaces implicites reconstruisant chaque partie du maillage avec l'iso-surface 0.5 des HRBFs. (e, f) Composition avec un opérateur d'union et les formes résultantes. Chaque sommet mémorise la valeur du potentiel en position de repos. (g) Durant l'animation, le maillage et les fonctions potentiel HRBFs sont transformés conjointement. Puis les sommets du maillage marchent le long du gradient du champ de potentiel jusqu'à atteindre leurs iso-valeur d'origine ; à moins qu'ils ne traversent une discontinuité de gradient modélisant la collision, auquel cas, ils s'arrêtent. En (h) cela produit le maillage final déformé. En (f), (g) et (h), les iso-surfaces des fonctions potentiel sont tracées dans un plan de section vertical passant par le squelette. En bleu, les valeurs extérieures de la surface implicite en rouge les valeurs intérieures.

produites, qui habituellement n'incluent pas le contact entre les différentes parties du modèle 3D.

Pour finir, les simulations physiquement réalistes peuvent produire des déformations beaucoup plus convaincantes [NTH01, TSIF05]. Néanmoins elles nécessitent des modèles complexes de muscles et d'os provenant généralement de données médicales ou bien définis par l'utilisateur. En outre la puissance de calcul requise en font des techniques uniquement appropriées pour le rendu hors ligne. Les méthodes intermédiaires comme l'elasticity skinning [MZS*11] calculent l'étirement et l'écrasement de la peau en résolvant les équations sous-jacentes des lois de la physique. Bien qu'étant robustes et visuellement plausibles, plusieurs secondes sont encore nécessaires pour le calcul d'une image.

Notre objectif est de fournir à l'artiste une technique temps réel, qui produit automatiquement des déformations sans auto-intersection quand un membre se replie et préserve l'aspect rigide des articulations (Figure 1(c)). Nous voulons aussi être capable de générer des effets subtils comme le gonflement (Figure 1(d)).

Pour ce faire, nous utilisons en entrée un maillage d'une résolution arbitrairement grande, son squelette et la segmentation de ce dernier sur le maillage. L'idée clef est de reconstruire une surface implicite pour chaque partie de maillage

liée à un os du squelette. Nous pouvons alors utiliser leur capacité à se combiner naturellement en utilisant des opérateurs comme l'union, le mélange basé-gradient ou le gonflement au contact basé-gradient [GBC*12]. Ces opérateurs nous permettent de représenter correctement la déformation de la peau au niveau d'une articulation pendant le mouvement. Le maillage correctement déformé est obtenu en lui appliquant le skinning géométrique puis en projetant les sommets sur la surface implicite. Nos principales contributions techniques sont :

- Une reconstruction du maillage spécifique pour ses différentes parties, en utilisant les fonctions à base radiale d'Hermite (HRBF) [Wen05].
- Un nouvel opérateur de mélange dédié à notre méthode.
- Un algorithme rapide de marche des sommets du maillage dans le champ de potentiel utilisé en alternance d'une relaxation spécifique du maillage, pour éviter l'introduction de distorsions durant la marche.

La technique résultante génère une déformation de la peau visuellement plausible en temps réel. Elle produit automatiquement une surface de contact entre deux membres, sans nécessiter de détection de collision. De plus elle fournit des paramètres intuitifs permettant à l'utilisateur d'affiner le résultat. Enfin, l'approche s'applique en tant que post-traitement d'une technique de skinning géométrique et peut donc être facilement intégrée dans une chaîne d'animation standard.

2. Travaux Précédents

Les déformations d'une peau contrôlées par un squelette ont été abordées pour la première fois lors de l'étude d'un modèle de main animée [MTLT88]. Cette technique applique une déformation en se basant sur des poids d'influences associés à chaque os. Elle est souvent désignée sous le nom de Linear Blending Skinning (LBS) ou encore SSD pour Skeletal Subspace Deformation. Ses limitations très connues, comme l'effet papier de bonbon (réduction du maillage en un point quand le maillage se vrille) et l'effondrement du coude (perte du volume au niveau de l'articulation), ont été considérablement étudiées.

Comme alternative les techniques basées sur l'exemple ont été développées. Les résultats sont très réalistes mais cette approche nécessite la production de plusieurs maillages statiques. En effet, différentes positions clef doivent être sculptées pour obtenir la déformation durant l'animation [LCF00, SRC01, KJP02, WP02, MG03, WPP07].

D'autres méthodes avancées ont été introduites pour limiter les artefacts du skinning standard tout en gardant sa simplicité d'utilisation. Elles reposent soit sur l'interpolation de matrices [MTCS*04, Kv05], les dual quaternions [KCvO08], les résolutions de systèmes d'équations par optimisation [KCO09, SZT*07] ou la mise à l'échelle des os [JS11]. Ces approches restent toutefois sujettes à l'effet d'effondrement du coude et produisent seulement des déformations lisses comme illustré dans la Figure 1(b) et 2(g). Des champs de hauteurs encodés le long de courbes spline ont été utilisés pour générer des déformations de types organiques [FOKGM07]. Cependant, les champs étant échantillonnés dans une texture la déformation ne s'adapte pas à celle du skinning pour éviter l'auto-intersection, contrairement à notre approche.

Les méthodes de skinning préservant le volume permettent à l'utilisateur de définir la correction du volume par le contrôle du gonflement et/ou des rides [FTS08, RHC09]. Néanmoins le calcul est plus coûteux que notre technique, et les contacts entre différents membres

ne sont pas traités. Les inter-collisions peuvent être évitées en utilisant un algorithme de préservation de volume basé sur l'intégration d'un champ vectoriel [AS07]. Malgré tout, cette solution ne s'adapte pas dans les chaînes d'animation standard puisqu'il faut tenir compte de la cohérence temporelle. De plus, les paramètres contrôlant la forme finale ne sont pas toujours intuitifs à définir pour l'utilisateur.

L'idée de mixer les avantages des représentations explicite et implicite pour l'animation de personnage n'est pas nouvelle. Les Metaballs [ST95], primitives implicites basées-polygone [SP95], surfaces de convolution [VOB99] et les primitives implicites ellipsoïdales [LAG01] ont été utilisées pour animer des personnages. Dans le dernier cas, il est possible d'ajouter des formes organiques (muscles) au maillage grossier représentant le corps. Plus proche de notre travail, la modélisation implicite a été utilisée pour améliorer les déformations du skinning [Blo02]. La forme est encodée par

l'axe médian, lui même animé au travers du skinning. Ceci limite les artefacts de l'effet emballage de bonbon et l'effondrement du coude. Toutefois la production de gonflement et les surfaces de contact ne sont pas pris en charge par cette approche.

À l'inverse de ces méthodes, nous n'utilisons pas les surfaces implicites pour modéliser la forme du personnage, mais pour préserver les propriétés du maillage et éviter l'auto-intersection. Les détails de la surface restent toujours encodés par le maillage.

3. Vue d'ensemble

Les différentes étapes de notre approche sont illustrées par la figure 2. Comme pour un skinning géométrique standard [MTLT88, KCvO08], nous commençons avec un maillage associé à un squelette d'animation. Ce dernier définit une hiérarchie d'os et leurs poids d'influence associés (Figure 2(a-b)). Nous supposons le maillage déjà partitionné selon chaque os de son squelette (Figure 2(c)). Ces données d'entrée peuvent être fournies par l'artiste ou générées automatiquement. Tous les exemples de l'article ont été produits en utilisant des poids de skinning calculés automatiquement avec la méthode de Baran et Popovic [BP07] basée sur l'équation de diffusion de la chaleur.

À partir de ces paramètres initiaux, nous utilisons les fonctions à bases radiales d'Hermite (HRBF) [Wen05] pour approximer chaque partie du maillage avec l'iso-surface 0.5 d'un champ de potentiel $f_i : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ (Figure 2(d), Section 4.1). Après cette étape, chaque sommet $\mathbf{v}$ du maillage mémorise son potentiel courant $f_i(\mathbf{v})$. Ces valeurs encodent les détails du maillage aux alentours de l'iso-surface 0.5 de f_i . Puis, une unique fonction potentiel f est définie en composant les f_i avec l'union [Ric73], le mélange basé-gradient ou le gonflement basé-gradient [GBC*12]. L'iso-surface 0.5 de f simule la déformation de la peau durant l'animation (Figures 2(e, f), Section 4.2). L'idée clef est d'animer à la fois le maillage avec un skinning géométrique et la fonction potentiel f . Pour cela nous appliquons la transformation rigide de chaque os à sa fonctions potentiel f_i associée. Les sommets du maillage marchent alors en suivant le gradient de f (Figure 2(g)) jusqu'à leur potentiel d'origine. Pour simuler le contact les sommets sont stoppés sur les discontinuités de gradient (Section 5). La déformation finale est montrée figure 2(h).

4. Reconstruction du champ de potentiel

Dans cette section, nous expliquons comment nous calculons la fonction potentiel f qui approxime le maillage et imite les déformations de la peau. La Section 4.1 présente une adaptation des méthodes HRBF pour reconstruire les parties de maillage associées aux os. La construction du champ de potentiel f final par composition des HRBFs est détaillée Section 4.2.

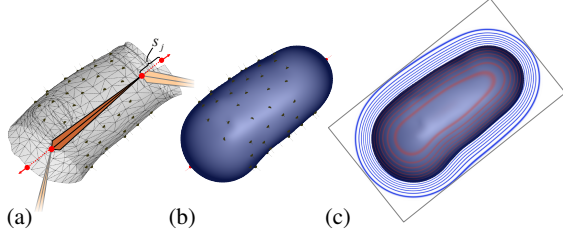


Figure 3: Reconstruction d'une partie d'un maillage (une phalange de la main présenté dans la figure 2). (a) Les centres des HRBFs sont répartis uniformément sur la surface du maillage, en rouge deux centres additionnels sont alignés avec l'os pour fermer les trous. (b) La surface implicite résultante, et (c) son champ de potentiel à support compact.

4.1. La reconstruction HRBF

Problématique : étant donné un os i et sa partie de maillage associée $\mathcal{M}_i$, notre objectif est de reconstruire un champ de potentiel lisse f_i dont l'iso-surface 0.5 approxime $\mathcal{M}_i$. En plus du problème de reconstruction standard, les fonctions f_i doivent satisfaire des contraintes spécifiques à notre contexte.

Tout d'abord, un champ très lisse est essentiel afin d'éviter des effets indésirables avec l'opérateur de mélange basé-gradient (Section 4.2) et stabiliser la projection des sommets par descente de gradient (Section 5). Un champ lisse demande aussi moins de paramètres, ce qui réduit l'empreinte mémoire et accélère la reconstruction et son évaluation. Pour atteindre un lissage suffisant tout en préservant les détails, notre idée est d'englober le maillage dans le volume implicite, plutôt que de le faire coïncider exactement avec l'iso-surface 0.5 : chaque sommet $\mathbf{v}_j$ mémorise son potentiel $f(\mathbf{v}_j)$ au repos, ce qui lui permet d'être projeté sur son iso-surface durant la déformation et ainsi de préserver les détails.

De plus, les fonctions potentiel f_i doivent correctement fermer les trous laissés lors du partitionnement des articulations.

Pour finir, les fonctions potentiel doivent être à support compact. Cela permet la composition locale des fonctions f_i et accélère l'évaluation de la fonction f . En particulier nous imposons que les fonctions f_i varient dans $[0, 1]$, en prenant 0.5 comme potentiel de référence pour définir la surface implicite. Nous utilisons la convention : $f_i(\mathbf{x}) > 0.5$ si $\mathbf{x}$ est à l'intérieur, $f_i(\mathbf{x}) < 0.5$ si $\mathbf{x}$ est à l'extérieur.

Les RBF d'Hermite : suivant toutes ces contraintes, nous proposons d'utiliser les RBFs d'Hermite [Wen05] pour reconstruire un champ de distance d_i global et signé. Il sera reparamétrisé dans un second temps pour obtenir les fonctions potentiel f_i à support compact.

Les HRBFs sont une variante des RBFs qui nous permettent d'interpoler de manière naturelle des données d'Her-

mite (jeu de positions et normales associées). Elles ne demandent pas de remplir tout l'espace avec des RBFs et ne reposent pas sur l'ajout de contraintes d'offsets sujettes à l'apparition de nombreux artefacts.

Selon la méthodologie des HRBFs, nous cherchons un champ de distance d_i de la forme :

$$d_i(\mathbf{x}) = \sum_k \lambda_k \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{v}_k\|) + \boldsymbol{\beta}_k^T \nabla \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{v}_k\|), \quad (1)$$

où les $\mathbf{v}_k$ sont les centres des RBFs, les scalaires λ_k et vecteurs $\boldsymbol{\beta}_k$ sont les coefficients inconnus, et ϕ est une fonction lisse pour laquelle nous recommandons la spline polyharmonique $\phi(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^3$. Étant donné un jeu de points $\mathbf{v}_k$ avec ses normales associées $\mathbf{n}_k$, les $4k$ coefficients inconnus sont facilement déterminés en résolvant le système de $4k$ équations : $d_i(\mathbf{v}_k) = 0$ et $\nabla d_i(\mathbf{v}_k) = \mathbf{n}_k$.

Reste le choix délicat des centres de RBFs. Nous voulons uniquement approximer les sous maillages $\mathcal{M}_i$ en entrée en laissant de côté les détails de surface. Un choix naturel est d'échantillonner la surface avec un nombre limité d'échantillons. Pour traiter de façon robuste des maillages de forme arbitraire, nous employons un échantillonnage par disques de Poisson [WCE07] (Figure 3(a)). Dans tous nos tests, un nombre de 50 échantillons s'est toujours révélé suffisant.

Bien que la RBFs $\phi(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^3$ tend naturellement à boucher les grands trous laissés aux extrémités des os (Figure 3(a)), un traitement spécial est indispensable. Quand une articulation est animée il faut garantir un comportement adéquat des fonctions potentiel f_i . Plus précisément, les fonctions f_i doivent être fermées de façon à ce que les champs adjacents glissent l'un sur l'autre sans introduire de trou, ni créer d'excroissance (voir figure 4).

Idéalement, les extrémités de deux champs partageant une articulation doivent être fermées par une hémisphère. Son rayon et son centre doivent être identiques et positionnés sur le milieu de l'articulation. Ceci est impossible en général car les maillages ne sont pas cylindriques. Partant de cette observation, l'idée est de contrôler la fermeture des champs de distance en ajoutant une contrainte de chaque côté de l'os i , le long de son axe et à une distance s_j de l'articulation j . Les contraintes de normales sont alignées avec l'os et pointent vers l'extérieur (Figure 3(a, b)). Par défaut, le rayon s_j est choisi comme étant la distance de l'articulation au plus proche sommet. Si besoin ce rayon peut ensuite être ajusté par l'utilisateur de façon interactive.

Afin que les HRBFs produisent une surface aussi lisse que possible, les échantillons trop proches d'une articulation sont automatiquement supprimés. À cette effet des plans de coupe orthogonaux à l'os sont placés à une distance h des extrémités. Formellement, soit $\mathbf{b}_i^0$ et $\mathbf{b}_i^1$ les deux extrémités de l'os i , tous les sommets $\mathbf{v}_k$ qui ne satisfont pas le critère suivant sont supprimés :

$$h < \frac{(\mathbf{v}_k - \mathbf{b}_i^0)^T (\mathbf{b}_i^1 - \mathbf{b}_i^0)}{\|\mathbf{b}_i^1 - \mathbf{b}_i^0\|^2} < 1 - h. \quad (2)$$

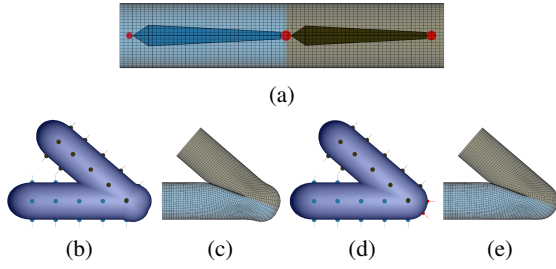


Figure 4: (a) Maillage d'un cylindre et un simple squelette composé de deux os. La ligne du bas représente différentes reconstructions des surfaces implicites. (b) Quand elles sont reconstruites sans nos contraintes de fermeture supplémentaire (points additionnels le long des axes des os), les jonctions des surfaces implicites se chevauchent de telle sorte que deux bosses apparaissent. (c) Le résultat visible après la projection des sommets du maillage. (d) Les contraintes de fermeture ajoutées pour palier à ce problème sont montrées en rouge. (e) Le maillage résultant après projection des sommets : les bosses sont évitées et le maillage modélise la jonction de façon appropriée.

Dans nos expérimentations nous fixons $h = 0.05$. Puisque les HRBFs sont calculées en quelques millisecondes, des sommets peuvent être facilement et interactivement ajoutés ou retirés par l'utilisateur lorsque la reconstruction automatique n'est pas entièrement satisfaisante.

Le re-paramétrage : pour finir, les fonctions potentiel f_i à support compact sont calculées en utilisant la composition $f_i(\mathbf{x}) = t_r(d_i(\mathbf{x}))$ avec t_r définie comme :

$$t_r(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x < -r \\ 0 & \text{si } x > r \\ -\frac{3}{16}(\frac{x}{r})^5 + \frac{5}{8}(\frac{x}{r})^3 - \frac{15}{16}(\frac{x}{r}) + \frac{1}{2} & \text{sinon,} \end{cases}$$

où r est la valeur qui définit la taille du support compact des fonctions f_i . La fonction de transfert t_r transforme les valeurs des HRBFs d_i comprises entre $[-r, r]$ sur l'intervalle $[0, 1]$, avec $t_r(-r) = 1$ et $t'_r(-r) = 0$ (à l'intérieur de la surface), $t_r(0) = 0.5$ (sur la surface) et $t_r(r) = t'_r(r) = 0$ (à l'extérieur). Ceci convertit le support infini de la HRBF d_i en une fonction potentiel f_i à support compact, tout en assurant la continuité au bord de son support. En pratique, nous voulons éviter des zones de l'espace où la valeur du potentiel est constante avec $f_i = 1$ à l'intérieur de la surface. Une zone avec des gradients nuls serait préjudiciable à la marche des sommets (Section 5). Nous fixons donc r à la plus grande distance entre l'os et les échantillons du maillage utilisés dans le calcul de f_i . Ainsi, $f_i = 1$ est seulement atteint sur le squelette et la taille du support se met naturellement à l'échelle par rapport à la forme reconstruite.

4.2. Composition en une unique fonction potentiel

Une fois que les fonctions potentiel f_i sont calculées, nous les combinons pour définir un champ de potentiel f ajusté sur tout le maillage afin de le déformer. Chaque paire de fonctions f_i et f_j associées à des os voisins sont composées en utilisant un opérateur binaire $g_k : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Le résultat de la composition est une nouvelle fonction potentiel $\tilde{f}_k = g_k(f_i, f_j)$. Le champ de potentiel final f est défini par l'union de toutes les paires de fonctions (f_i, f_j) en utilisant l'opérateur max de Ricci [Ric73] :

$$f = \max_k(\tilde{f}_k) \quad (3)$$

Le choix des opérateurs g_k dépend de la déformation désirée. Par exemple, l'union $\tilde{f}_k = \max(f_i, f_j)$ (Figure 5(a)) peut être utilisée pour générer un pli. Ceci produit le résultat montré dans les Figures 1(c) et 2(h).

Les opérateurs de mélange lisse comme la somme [Bli82, BWd04, BBCW10] et le gonflement au contact [Can93] sont très populaires en modélisation par surfaces implicites. Ils peuvent être utiles pour représenter des surfaces lisses près des articulations comme l'épaule, ou des effets de gonflements des tissus comme sur un doigt plié. La version standard de ces opérateurs crée des gonflements indésirables, et donc, une déformation du maillage inadapté quand un os est animé (Figure 5(b) pour le mélange lisse). À leur place, nous utilisons des opérateurs basés-gradient, récemment introduits dans [GBC*12]. Ces opérateurs interpolent l'union et le mélange selon un paramètre θ , fonction de l'angle entre les gradients. Ainsi, une union est produite si $\theta = \theta_u$, un mélange quand $\theta = \theta_m$, et un mélange de taille intermédiaire quand θ varie entre $[\theta_m, \theta_u]$. Une composition sans gonflement indésirable est obtenue en définissant θ comme fonction de l'angle α entre le gradient des champs f_i et f_j . À chaque point de l'espace $\mathbf{p}$:

$$\theta = \theta(\alpha(\mathbf{p})) \text{ avec } \alpha(\mathbf{p}) = \arccos \frac{(\nabla f_i(\mathbf{p}))^T \nabla f_j(\mathbf{p})}{\|\nabla f_i(\mathbf{p})\| \|\nabla f_j(\mathbf{p})\|} \quad (4)$$

On remarque que dans le pli d'une articulation, l'angle α entre les gradients est souvent proche de la valeur de l'angle entre les os associés à f_i et f_j (Figure 7(a)). Ceci permet un réglage des paramètres plus intuitifs.

Prenons l'exemple d'une articulation avec une peau sans pli pour des petits angles de rotation, comme pour le coude ou le genou. En fixant $\theta(0) = \theta_u$ (l'union illustrée figure 5(c)), nous évitons le mélange quand f_i et f_j sont alignés, i.e. quand leurs gradients sont colinéaires ou quand leurs os sont alignés, ce qui évite des gonflements indésirables. En fixant aussi $\theta(\pi/4) = \theta_m$ (mélange illustré figure 5(d)), nous générons un mélange maximum entre f_i et f_j ce qui correspondrait, par exemple, à la tension de la peau lors d'une légère flexion d'un coude. On observe que pour un coude ou un genou, la composition devrait revenir à une union quand $\alpha = \pi/2$ (Figure 5(e)) car un pli se forme. Pour représenter le pli jusqu'à la flexion maximale, l'opérateur doit rester une union. Nous fixons donc aussi $\theta(\alpha) = \theta_u$

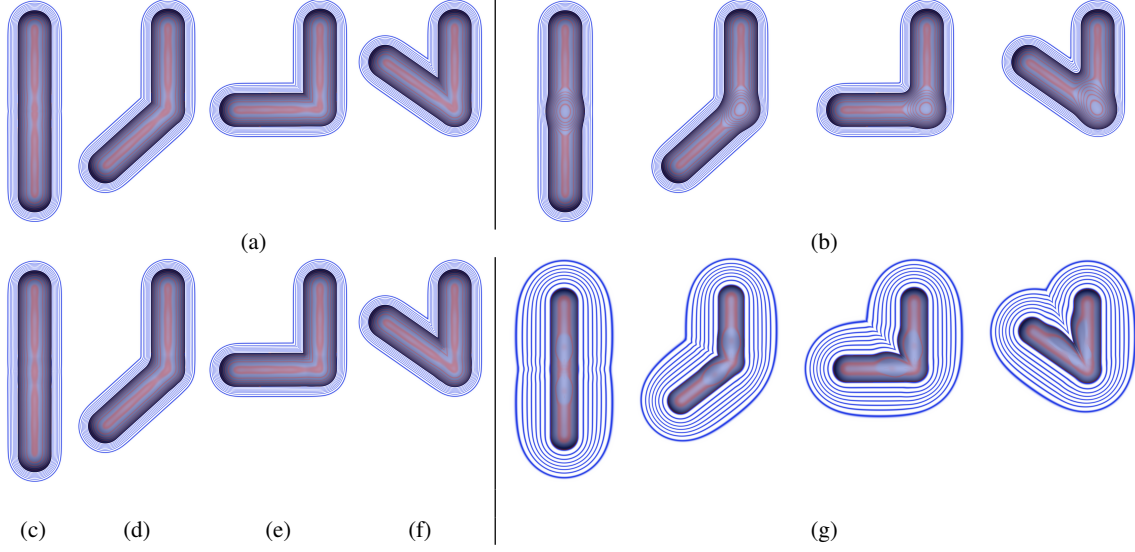


Figure 5: Reconstruction du cylindre de la figure 4(a). Les lignes de champ sont affichées sur une section plane de la fonction potentiel $\tilde{f}$. Différentes compositions sont illustrées : en (a) une union standard, en (b) un mélange standard, et en (c, d, e, f) notre nouvel opérateur de mélange basé-gradient. Enfin en (g) l'opérateur de gonflement au contact basé-gradient.

pour $\alpha \in [\pi/2, \pi]$ (Figure 5(f)). Ce paramétrage spécifique pour le coude et le genou nous mène au graphe de $\theta(\alpha)$ présenté figure 6(a). Les équations des opérateurs correspondant sont calculées à partir de la définition par morceaux donnée dans [GBC*12], en utilisant $\theta_u = \pi/4$, $\theta_m = 0$ et les paramètres de la première ligne de la table 1.

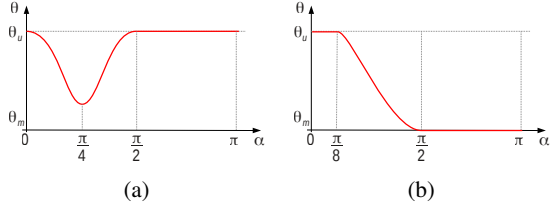


Figure 6: Tracé de nos fonctions $\theta(\alpha)$. En (a) pour imiter la déformation d'un coude ou d'un genou, et (b) pour imiter l'inflation du muscle dans une situation de contact.

Table 1: Valeurs des paramètres définissant nos différentes fonctions $\theta(\alpha)$.

	α_0	α_1	α_2	θ_0	θ_1	θ_2	w_0	w_1
Coude	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$\pi/4$	$2\pi/15$	$\pi/4$	1	1
Gonflement	$\pi/8$	$\pi/2$	π	$\pi/4$	0	0	0.05	1

En pratique, nous devons modifier l'opérateur de mélange basé-gradient introduit dans [GBC*12]. En effet, l'opérateur existant produit une dépression interne autour des articulations, comme illustré dans la figure 7(b). Or le gradient sera utilisé pour déformer le maillage (Section 5). Des gradients

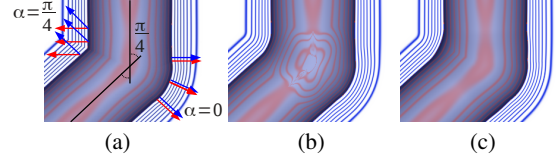


Figure 7: (a) Union des deux champs reconstruisant le cylindre de la figure 4(a) après une flexion de $\pi/4$. Les flèches bleues sont les gradients de la fonction de champ cylindrique inférieur et les flèches rouges sont les gradients du champ supérieur. Sur la gauche, les gradients forment un angle de $\alpha = \pi/4$, et sur la droite ils sont colinéaires ($\alpha = 0$). (b) Illustration du type de distorsion introduite par l'opérateur de mélange basé-gradient autour de l'articulation. (c) Notre opérateur de mélange basé-gradient évitant ces dépressions indésirables.

consistants à l'intérieur de la forme sont primordiaux car il faut pouvoir assurer une marche robuste des sommets situés à cet endroit. Nous modifions donc l'opérateur de mélange pour produire un champ intérieur adapté à notre algorithme de projection (présenté Section 5).

En partant de l'opérateur de mélange basé-gradient original, nous modifions la partie intérieure de façon à ce que le mélange diminue entre les valeurs de champ 0.5 et 0.7. Plus profondément dans le champ, quand $f_i > 0.7$ ou $f_j > 0.7$, l'opérateur est un max (union figure 7(c)). Ceci mène à la définition suivante pour notre nouvel opérateur de mélange

g_m :

$$g_m(f_i, f_j) = \begin{cases} \max(f_i, f_j) & \text{si } f_i > 0.7 \text{ ou } f_j > 0.7 \\ \max(f_i, f_j) & \text{si } f_i < k_\theta(f_j) \text{ ou } f_j < k_\theta(f_i) \\ \bar{g}_m(f_i, f_j) & \text{sinon.} \end{cases}$$

où la valeur $\bar{g}_m$ pour (f_i, f_j) est la solution de l'équation suivante résolue en C :

$$\frac{\sqrt{(f_i - k_\theta(C))^2 + (f_j - k_\theta(C))^2}}{(C - k_\theta(C))} = 1, \quad (5)$$

et la fonction $k_\theta(x)$ est définie comme :

$$k_\theta(x) = \begin{cases} \tan(\theta)x & \text{si } f_i \leq 0.5 \text{ et } f_j \leq 0.5 \\ \frac{1}{2}(7 - 5\tan(\theta))x + \frac{7}{4}(\tan(\theta) - 1) & \text{sinon.} \end{cases}$$

L'équation 5 n'a pas besoin d'être résolue analytiquement. Une solution numérique de g_m est pré-calculée dans une texture 3D suivant la procédure présentée dans [GBC*12]. Comme décrit dans [GBC*12], cette procédure requiert la définition d'une fonction $\bar{s} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Dans notre cas nous utilisons $\bar{s} = 1$.

D'autres types d'articulations, comme les phalanges, produisent presque immédiatement un gonflement des tissus. Ceci est modélisé avec l'opérateur de gonflement au contact basé-gradient de [GBC*12]. Cet opérateur permet l'interpolation entre une union et une surface de contact entourée par un gonflement, donnant un aspect organique à la forme résultante (voir figure 5(g)). Comme pour l'opérateur de mélange basé-gradient, le choix de valeur spécifique pour θ nous autorise à régler le comportement du gonflement quand une articulation se plie. Pour éviter les gonflements indésirables au niveau d'une articulation en position de repos, nous fixons $\theta(0) = \theta_u$ (union). Ensuite nous augmentons lentement le gonflement jusqu'à son maximum quand les os sont orthogonaux ($\alpha = \pi/2$), et nous le gardons au maximum pour des angles plus grands, en fixant $\theta(\alpha) = \theta_m, \forall \alpha \in [\pi/2, \pi]$ (figure 6(b)). L'équation de l'opérateur est donnée en paramétrant la définition par morceau donnée dans [GBC*12] avec les paramètres de la seconde ligne de la Table 1.

5. Suivi de surface

Durant l'animation, les primitives implicites f_i associées à chaque os se voient appliquer leur transformation rigide. Puis elles sont combinées tels que décrit dans la section précédente. Il en résulte un champ de potentiel global f dépendant du temps. Nous pourrions déformer le maillage en suivant l'iso-surface 0.5 avec les dérivées partielles de f en suivant la méthode de [SS11]. Toutefois cela produit d'importantes distorsions dans le maillage déformé après quelques transformations. Nous proposons plutôt de prendre en compte toute la région où f est non nulle, et de l'utiliser pour contrôler les déformations du maillages en partant d'une pose de skinning géométrique standard. Ceci nous permet de déformer le maillage à bas coût, tout en conservant ses détails.

Nous utilisons les dual quaternions [KCvO08] pour donner une pose initiale au maillage à chaque pas d'animation. Le défi consiste alors à définir un opérateur de projection rapide pour corriger la position des sommets. Il devra prendre en compte la forme et les détails du maillage au repos, et la déformation modélisée par f . Notre solution consiste à utiliser la projection dans les directions des gradients de f , couplée avec une relaxation tangentielle et un lissage laplacien local, comme détaillé ci-dessous.

Projection des sommets : au repos, les sommets ne sont pas exactement positionnés sur l'iso-surface 0.5 de f . Pour chaque sommet $\mathbf{v}_i$, nous mémorisons donc leur iso-valeur d'origine $iso_i = f(\mathbf{v}_i)$. Durant la déformation, nous projetons chaque sommet sur son iso-surface, ce qui nous permet de tenir compte de la forme du maillage, de ses détails et de la déformation courante. Ceci est accompli en utilisant des itérations de Newton, que nous avons trouvées plus robuste et plus rapide qu'un pas constant :

$$\mathbf{v} = \mathbf{v} + \sigma (f(\mathbf{v}) - iso_i) \frac{\nabla f(\mathbf{v})}{\|\nabla f(\mathbf{v})\|^2} \quad (6)$$

En pratique nous fixons $\sigma = 0.35$.

Pour empêcher toute auto-intersection de la surface finale (Figure 8(a)), comme pour préserver la régularité du maillage, la projection doit être stoppée sur la surface de contact entre les différents membres (Figure 8(b)). Les surfaces de contact correspondent aux discontinuités du gradient du champ de potentiel. Par conséquent, durant la projection nous gardons la trace de l'angle γ entre les gradients de deux itérations consécutives, et stoppons quand $\gamma > \gamma_{\max}$, considérant que nous sommes sur une surface de contact (voir figures 2(h) et 8(b)). Nous avons fixé expérimentalement $\gamma_{\max} = 55^\circ$.

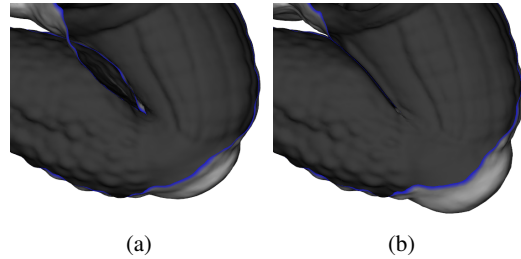


Figure 8: Une section du genou de l'Armadillo (Figure 9) révélant l'intérieur du maillage en gris sombre, et l'extérieur en gris clair. Le bleu représente les bords sectionnés par le plan de coupe. (a) Le LBS génère une auto-intersection, en (b) notre méthode produit une surface de contact.

Relaxation tangentielle : la position initiale d'un sommet produite par un skinning géométrique peut être loin de sa position finale. Ainsi, n'utiliser que la projection précédente

peut introduire des distorsions des faces du maillage et causer des auto-intersections. Dans le but d'améliorer la marche des sommets dans le champ de gradient, nous entrelaçons les pas de projection avec une relaxation tangentielle. Celle-ci bouge chaque sommet vers le barycentre pondéré de ses voisins.

Formellement, soit un sommet $\mathbf{v}_i$, et $\mathbf{q}_{i,j}$ son premier anneau de voisinage projeté sur son plan tangent. Comme post-traitement, nous calculons les coordonnées barycentriques $\Phi_{i,j}$ telles que $\mathbf{v}_i = \sum_j \Phi_{i,j} \mathbf{q}_{i,j}$ en utilisant la technique des coordonnées moyennes (mean value coordinates) [HF06]. Chaque pas de relaxation remplace les sommets de façon tangentielle à la surface en utilisant :

$$\mathbf{v}_i = (1 - \mu) \mathbf{v}_i + \mu \sum_j \Phi_{i,j} \mathbf{q}_{i,j}, \quad (7)$$

où $\mu \in [0, 1]$ contrôle la force de la relaxation. Par construction, elle n'a pas d'effet en position de repos, tandis qu'après déformation elle améliore la répartition des sommets car elle tend à reproduire leur organisation initiale. En pratique, un pas de relaxation est appliqué à chaque paire de pas de projection d'un sommet. Le paramètre μ est ajusté de façon à ce que les sommets déjà proches de leur iso-surface cible bougent peu. Ceci est réalisé en fixant :

$$\mu = \max(0, 1 - (|f(\mathbf{v}_i) - iso_i| - 1)^4). \quad (8)$$

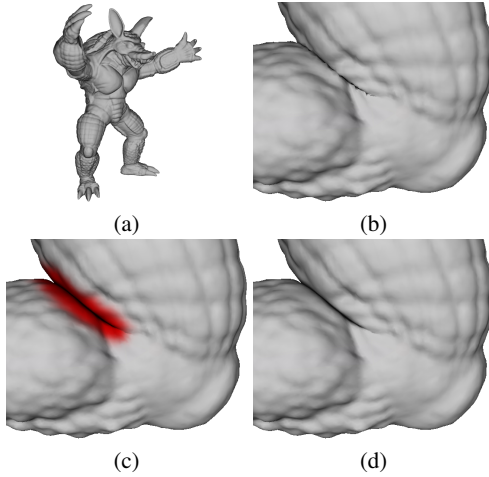


Figure 9: Animation du genou de l'Armadillo en (a). (b) Résultat de la projection sans lissage. (c) En rouge, la zone qui a besoin d'être lissée et (d) le résultat après quelques pas de lissage laplacien dans cette zone.

Lissage laplacien : même si nous supposons une entrée lisse, une déformation comme l'union introduit des arêtes à la limite des régions en contact. Ces dernières doivent

être lissées pour se rapprocher d'une déformation de la peau à l'aspect plus élastique. Nous enlevons ces hautes fréquences en appliquant localement un lissage laplacien sur le maillage :

$$\mathbf{v}_i = (1 - \beta_i) \mathbf{v}_i + \beta_i \tilde{\mathbf{v}}_i, \quad (9)$$

où $\tilde{\mathbf{v}}_i$ est le barycentre du premier anneau de voisinage de $\mathbf{v}_i$ et β_i contrôle la force du lissage. Ceci est seulement fait pour les sommets du maillage marqués comme étant dans des régions en contact, de telle sorte que les détails de surface soient bien préservés ailleurs. À cet effet, nous fixons tout d'abord β_i à 1 pour les sommets stoppés par une discontinuité de gradient et à 0 pour les autres. Puis nous lissons les valeurs β_i sur le maillage par diffusion, avant d'appliquer le lissage laplacien. Comme montré figure 9(d), ceci lisse efficacement les oscillations du maillage sur les arêtes, résultant en une forme à l'aspect organique.

6. Mise en œuvre et résultats

Mise en œuvre : tous nos résultats ont été générés avec un processeur Intel Core i7 950 à 3.0GHz, 12GB de mémoire vive et une Geforce 480 GTX. Notre code CUDA utilise de façon intensive le parallélisme GPU. En particulier les dual quaternions, la projection, la relaxation tangentielle et le lissage laplacien localisé sont tous effectués en parallèle par sommet. Les fonctions potentiel f_i (Section 4.1) et opérateurs de compositions g_m (Section 4.2) sont respectivement échantillonnés à des résolutions de 32^3 et 128^3 dans des textures 3D. Ceci permet leur évaluation très rapide sur le GPU par interpolation trilineaire. Généralement un modèle composé de 50 à 150 os nécessite de 25Mo à 75Mo de mémoire pour stocker ces fonctions potentiel.

Les performances sont résumées table 2. Le taux d'image par seconde prend en compte la déformation et le rendu OpenGL du maillage avec un shader de Phong. Les faibles performances de l'Armadillo sont dues à son très grand nombre de sommets. Notre projection est pour le moment appliquée sur tous les sommets du maillage, quel que soit le nombre d'os animés. Cela pourrait être optimisé si seulement des déformations locales sont appliquées.

	sommets	os	fps
Main	7707	21	90
Armadillo	172974	23	17
Juna	7973	55	70

Table 2: Images par secondes pour nos différents modèles animés avec notre méthode.

Déformations : nous illustrons notre technique de skinning avec différents opérateurs de composition, et plusieurs poses des modèles. Le modèle Juna (Figure 10(a)) utilise notre nouvel opérateur de mélange basé-gradient pour

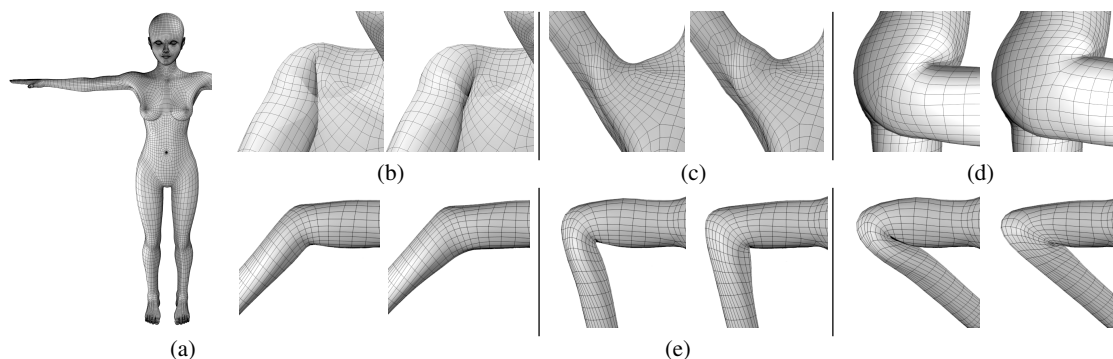


Figure 10: (a) Le modèle Juna sur lequel différentes déformations sont illustrées. Sur la première ligne, chaque paire d'images compare le LBS (à gauche) et notre déformation (à droite). En (b, c) deux poses de l'épaule et (d) la hanche. Sur la seconde ligne (e), chaque paire d'images compare les dual quaternions (à gauche) et notre déformation (à droite) avec différentes poses du coude.

déformer son épaule (Figure 10(b, c)) et son coude (Figure 10(e)). L'opérateur d'union est utilisé pour les hanches (Figure 10(d)). Nous observons que notre opérateur capture correctement l'aspect solide d'une épaule et d'un genou. L'intérieur de l'articulation présente une déformation de la peau lisse en début de rotation, suivie d'un contact entre les membres. Les articulations complexes comme l'épaule et la hanche sont déformées de façon vraisemblable. Le modèle Dana, présenté texturé et déformé avec notre méthode dans une pose complexe en Figure 11, utilise le même assemblage d'opérateurs de composition. Nous pouvons observer sur le maillage de ce modèle (Figure 12) l'effet de perte de volume et de génération d'auto-intersections lorsqu'il est déformé avec le LBS (Figure 12(gauche)), l'effet de gonflement avec les dual quaternions (Figure 12(milieu)) et la correction de ces problèmes avec notre méthode (Figure 12(droite)). Nous utilisons aussi notre opérateur de mélange pour le genou de l'Armaddillio. Ici encore, la déformation lisse et le contact sont générés de façon adéquate tandis que les détails du maillage sur la cuisse et le mollet sont bien préservés (Figure 9).

Les déformations de la phalange quand les doigts se plient sont bien capturées en utilisant l'opérateur de gonflement au contact basé-gradient (Figure 1(d)). Cela améliore les résultats produits par l'opérateur d'union (Figure 1(c)) en imitant le gonflement des tissus. Notre technique résout aussi l'effet papier de bonbon quand les os se vrillent. Ceci est illustré sur un cylindre Figure 13 où l'on peut voir que la déformation est correctement corrigée, même en appliquant un mélange fort qui complique la projection des sommets.

Interactions utilisateur : Notre application inclut tous les paramètres fixés tel que décrit dans le papier. La solution de skinning produite automatiquement est satisfaisante dans la plupart des cas. Tous les paramètres peuvent cependant être édités en un temps interactif. Le nombre, la position des échantillons utilisés pour la reconstruction, ou l'empla-



Figure 11: Pose du modèle Dana lors d'une animation de "break dance". Le modèle est texturé et déformé avec notre méthode.

cement des points de fermeture, peuvent toujours être édités interactivement par sélection directe, sur le maillage déformé. La génération des f_i et leur stockage dans une grille 3D prend seulement quelques millisecondes.

L'utilisateur peut aussi éditer et contrôler la déformation de la peau au niveau des articulations en temps-réel. Cela lui permet de s'abstraire de la théorie : après avoir sélectionné l'opérateur de composition (union, mélange, gonflement au contact) il peut ajuster les paramètres en manipulant le fléchissement à des angles spécifiques, régler la forme de la composition et observer l'animation résultante.

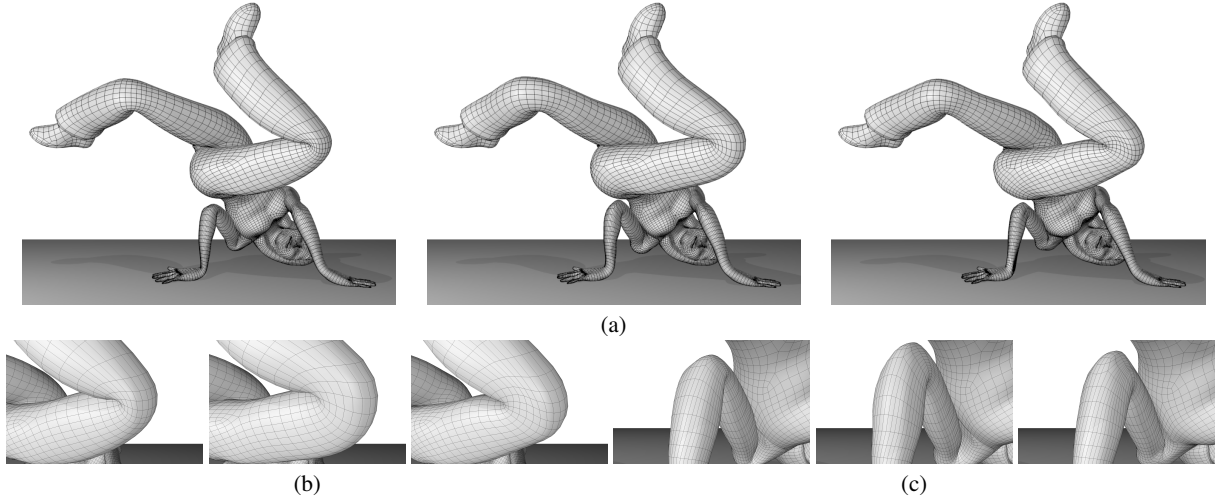


Figure 12: Illustration du maillage du modèle Dana présenté en Figure 11. De gauche à droite, le maillage a été déformé avec le LBS, les dual quaternions puis notre méthode. (a), Une vue générale du maillage. On peut voir la déformation très lisse du LBS qui produit une forte perte de volume et des auto-intersections, celle générée par les dual quaternions qui gonflent le maillage et notre méthode qui corrige ces problèmes et amène à un résultat visuellement crédible. (b), zoom sur le genou et (c), zoom sur le coude.

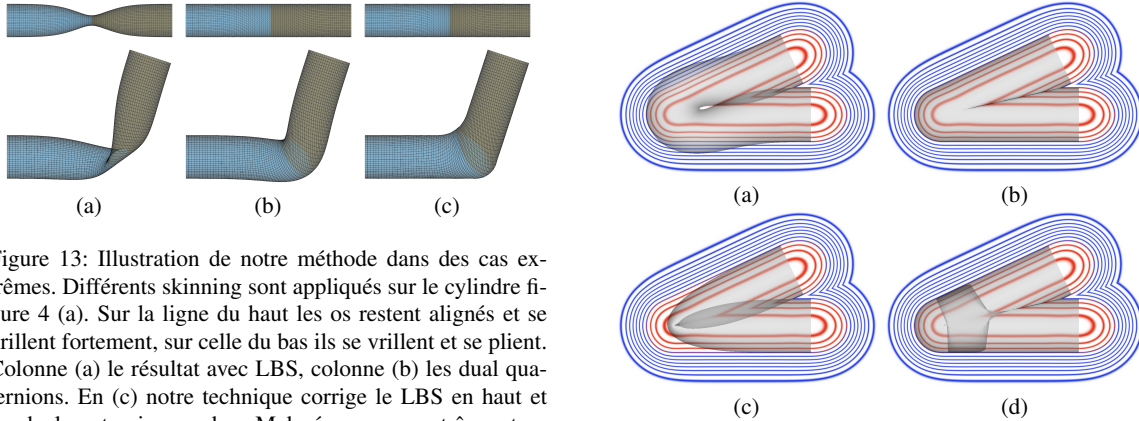


Figure 13: Illustration de notre méthode dans des cas extrêmes. Différents skinning sont appliqués sur le cylindre figure 4 (a). Sur la ligne du haut les os restent alignés et se vrillent fortement, sur celle du bas ils se vrillent et se plient. Colonnes (a) le résultat avec LBS, colonnes (b) les dual quaternions. En (c) notre technique corrige le LBS en haut et les dual quaternions en bas. Malgré une pose extrême et un mélange au maximum peu de distorsions subsistent.

7. Discussion et limitations

Influence de la solution initiale : notre technique se base sur une position initiale donnée par un skinning géométrique (Section 5). La qualité du résultat est donc affecté par les caractéristiques de cette solution. En particulier, notre correction donne de meilleurs résultats si la diffusion des poids d'influences des os est assez grande sur le maillage pour produire une déformation lisse. Le skinning géométrique utilisé doit aussi éviter l'apparition de profondes auto-intersections qui pourraient positionner les sommets du maillage au-delà des os. Dans ce cas, les sommets peuvent être projetés sur la surface opposée, comme illustré avec l'opérateur d'union figure 14 :

Figure 14: Le champ de potentiel d'un cylindre plié, reconstruit par une union de deux cylindres implicites. En rouge, la partie intérieure, et en bleu l'extérieur. Le maillage est montré en transparence. En (a) Le maillage déformé en utilisant les dual quaternions est facilement corrigé avec (b) notre méthode. Toutefois, le maillage déformé en (c) avec le LBS, présente un ensemble de sommets en auto-intersection, qui dépasse le centre des os. En (d) cela mène à des projections dans la mauvaise direction.

dans la première ligne de la figure, la déformation des dual quaternions (Figure 14(a)) permet une correction adéquate (Figure 14(b)), tandis que le LBS utilisé en entrée pour la

seconde ligne, génère une profonde auto-intersection (Figure 14(c)) causant l'échec de notre approche (Figure 14(d)).

Déformation molles : les déformations organiques molles comme l'animation du cou d'une girafe ou de membres sans os comme les tentacules d'une pieuvre ne sont pas traitées par notre technique. Dans ces cas, l'utilisation du LBS couplé à un nombre important de petits os peut s'avérer plus approprié du fait de son aspect très lisse.

8. Conclusion et travaux futurs

Nous avons présenté une nouvelle approche de skinning pour personnages virtuels qui opère en temps réel. Elle est basée sur l'enveloppement d'un maillage dans un volume implicite déformable, fait de parties rigides associées à chaque os. Notre approche compense la perte de volume inhérente au skinning géométrique standard. Choisir la façon dont les parties implicites sont combinées nous permet de produire des formes de peaux lisses ou des pliures franches quand l'articulation se fléchit. Des surfaces de contact entre les membres sont générées automatiquement avec si besoin un effet de gonflement. Ceci nous permet d'arriver à des déformations visuellement plausibles pour les différentes articulations du corps, même pour des angles de flexion extrêmes. Aucune optimisation ni traitement des collisions ne sont requis. La méthode est donc robuste et rapide à l'exécution. Pour finir, le calcul étant indépendant du temps, la technique s'intègre parfaitement à une chaîne d'animation standard.

Dans les travaux futurs, nous voudrions étudier les manières de générer les surfaces de contact entre deux membres non voisins qui requièrent des combinaisons différentes entre les fonctions potentiel. Ceci pourrait demander d'étendre l'opérateur de composition basé-gradient à une composition n-aire. Les valeurs du champ le long de la surface de contact pourraient être utilisées, soit pour évaluer les forces de contact à appliquer aux os du squelette, ou simplement pour détecter qu'un angle limite a été atteint. Nous voudrions aussi développer des combinaisons d'opérateurs plus générales nous permettant de capturer à la fois des mélanges lisses pour des angles faibles et des gonflements pour des flexions plus grandes. Enfin, en s'inspirant de [RHC09], notre technique de skinning pourrait être paramétrée par des courbes de profils décrivant directement la forme désirée. Ces courbes, pourraient inclure des rides comme par exemple sur un poignet, et dirigeraient la génération d'un opérateur de mélange basé-gradient spécifique à cette courbe.

Remerciements

Ces travaux ont été financés par le projet IM&M (ANR-11-JS02-007), le "Natural Science and Engineering Research Council" (Canada) et la "Advanced grant EXPRES-SIVE" du comité de recherche européen.

Références

- [AS07] ANGELIDIS A., SINGH K. : Kinodynamic skinning using volume-preserving deformations. In *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation* (Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2007), SCA '07, Eurographics Association, pp. 129–140.
- [BBCW10] BERNHARDT A., BARTHE L., CANI M.-P., WYVILL B. : Implicit blending revisited. *Comput. Graph. Forum. Vol. 29*, Num. 2 (2010), 367–375.
- [Bli82] BLINN J. F. : A generalization of algebraic surface drawing. *ACM Trans. Graph.. Vol. 1*, Num. 3 (1982), 235–256.
- [Blo02] BLOOMENTHAL J. : Medial-based vertex deformation. In *Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation* (New York, NY, USA, 2002), SCA'02, ACM, pp. 147–151.
- [BP07] BARAN I., POPOVIĆ J. : Automatic rigging and animation of 3d characters. In *ACM SIGGRAPH 2007 papers* (New York, NY, USA, 2007), SIGGRAPH '07, ACM.
- [BTST11] BHARAJ G., THORMÄHLEN T., SEIDEL H.-P., THEOBALT C. : Automatically rigging multi-component characters. *Comp. Graph. Forum (Proc. Eurographics 2012). Vol. 30*, Num. 2 (2011).
- [BWd04] BARTHE L., WYVILL B., DE GROOT E. : Controllable binary csg operators for "soft objects". *International Journal of Shape Modeling. Vol. 10*, Num. 2 (2004), 135–154.
- [Can93] CANI M.-P. : An implicit formulation for precise contact modeling between flexible solids. In *20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1993* (1993), pp. 313–320. Published as Marie-Paule Gascuel.
- [FOKGM07] FORSTMANN S., OHYA J., KROHN-GRIMBERGHE A., MCDUGALL R. : Deformation styles for spline-based skeletal animation. *Symposium on Computer Animation (SCA)* (2007), 141–150.
- [FTS08] FUNCK W. V., THEISEL H., SEIDEL H. P. : Volume-preserving mesh skinning. *Workshop on Vision, Modeling and Visualization (VMV)* (2008).
- [GBC*12] GOURMEL O., BARTHE L., CANI M.-P., WYVILL B., BERNHARDT A., PAULIN M., GRASSBERGER H. : A gradient-based implicit blend. *Accepté avec révision mineure à ACM Transactions on Graphics* (2012). A paraître.
- [HF06] HORMANN K., FLOATER M. S. : Mean value coordinates for arbitrary planar polygons. *ACM Transaction on Graphics (TOG). Vol. 25*, Num. 4 (2006).
- [JBPS11] JACOBSON A., BARAN I., POPOVIĆ J., SORKINE O. : Bounded biharmonic weights for real-time de-

- formation. *ACM Transactions on Graphics (proceedings of ACM SIGGRAPH)*. Vol. 30, Num. 4 (2011), 78 :1–78 :8.
- [JS11] JACOBSON A., SORKINE O. : Stretchable and twistable bones for skeletal shape deformation. *ACM Transactions on Graphics (proceedings of ACM SIGGRAPH ASIA)*. Vol. 30, Num. 6 (2011), 165 :1–165 :8.
- [KCO09] KAVAN L., COLLINS S., O’SULLIVAN C. : Automatic linearization of nonlinear skinning. In *Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games* (New York, NY, USA, 2009), I3D ’09, ACM, pp. 49–56.
- [KCvO08] KAVAN L., COLLINS S., ŽÁRA J., O’SULLIVAN C. : Geometric skinning with approximate dual quaternion blending. *ACM Trans. Graph.*. Vol. 27 (November 2008), 105 :1–105 :23.
- [KJP02] KRY P. G., JAMES D. L., PAI D. K. : Eigenskin : real time large deformation character skinning in hardware. In *Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation* (New York, NY, USA, 2002), SCA ’02, ACM, pp. 153–159.
- [Kv05] KAVAN L., ŽÁRA J. : Spherical blend skinning : a real-time deformation of articulated models. In *Proceedings of the 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games* (New York, NY, USA, 2005), I3D ’05, ACM, pp. 9–16.
- [LAG01] LECLERCQ A., AKKOUCHE S., GALIN E. : Mixing triangle meshes and implicit surfaces in character animation. In *Proceedings of the Eurographic workshop on Computer animation and simulation* (New York, NY, USA, 2001), Springer-Verlag New York, Inc., pp. 37–47.
- [LCF00] LEWIS J. P., CORDNER M., FONG N. : 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* (New York, NY, USA, 2000), SIGGRAPH ’00, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 165–172.
- [MG03] MOHR A., GLEICHER M. : Building efficient, accurate character skins from examples. In *ACM SIGGRAPH 2003 Papers* (New York, NY, USA, 2003), SIGGRAPH ’03, ACM, pp. 562–568.
- [MTCS*04] MAGNENAT-THALMANN N., CORDIER F., SEO H., PAPAGIANAKIS G. : Modeling of bodies and clothes for virtual environments. *International Conference on Cyberworlds* (2004).
- [MTLT88] MAGNENAT-THALMANN N., LAPERRIÈRE R., THALMANN D. : Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping. In *Proceedings on Graphics interface ’88* (Toronto, Ont., Canada, Canada, 1988), Canadian Information Processing Society, pp. 26–33.
- [MZS*11] MCADAMS A., ZHU Y., SELLE A., EMPEY M., TAMSTORF R., TERAN J., SIFAKIS E. : Efficient elasticity for character skinning with contact and collisions. In *ACM SIGGRAPH 2011 papers* (New York, NY, USA, 2011), SIGGRAPH ’11, ACM, pp. 37 :1–37 :12.
- [NTH01] NG-THOW-HING V. : *Anatomically-based models for physical and geometric reconstruction of humans and other animals*. PhD thesis, Toronto, Ont., Canada, Canada, 2001. AAINQ58941.
- [RHC09] ROHMER D., HAHMANN S., CANI M.-P. : Exact volume preserving skinning with shape control. In *Proceedings of the 2009 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation* (New York, NY, USA, 2009), SCA ’09, ACM, pp. 83–92.
- [Ric73] RICCI A. : Constructive Geometry for Computer Graphics. *computer journal*. Vol. 16, Num. 2 (May 1973), 157–160.
- [SP95] SINGH K., PARENT R. : Implicit surface based deformations of polyhedral objects. In *first EG workshop on Implicit Surfaces* (1995). Invited Paper.
- [SRC01] SLOAN P.-P. J., ROSE C. F., COHEN M. F. : Shape by example. *ACM Symposium on Interactive 3D Graphics (i3D)* (2001), 135–143.
- [SS11] STAM J., SCHMIDT R. : On the velocity of an implicit surface. *ACM Trans. Graph.*. Vol. 30, Num. 3 (mai 2011), 21 :1–21 :7.
- [ST95] SHEN J., THALMANN D. : Interactive shape design using metaballs and splines. In *Proceedings of Implicit Surfaces* (1995), pp. 187–196.
- [SZT*07] SHI X., ZHOU K., TONG Y., DESBRUN M., BAO H., GUO B. : Mesh puppetry : Cascading optimization of mesh deformation with inverse kinematics. *ACM Transaction on Graphics (TOG), Proceedings of ACM SIGGRAPH*. Vol. 26, Num. 3 (2007).
- [TSIF05] TERAN J., SIFAKIS E., IRVING G., FEDKIW R. : Robust quasistatic finite elements and flesh simulation. In *ACM/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA)* (2005), Anjyo K., Faloutsos P., (Eds.), pp. 181–190.
- [VOB99] VAN OVERVELD C. W. A. M., BROEK B. C. V. D. : Using the implicit surface paradigm for smooth animation of triangle meshes. In *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics* (Washington, DC, USA, 1999), CGI ’99, IEEE Computer Society, pp. 214–221.
- [WCE07] WHITE K. B., CLINE D., EGBERT P. K. : Poisson disk point sets by hierarchical dart throwing. In *Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing* (Washington, DC, USA, 2007), RT ’07, IEEE Computer Society, pp. 129–132.
- [Wen05] WENDLAND H. : *Scattered Data Approximation*. Cambridge University Press, 2005, ch. 16.2 - Hermite–Birkhoff interpolation.
- [WP02] WANG X. C., PHILLIPS C. : Multi-weight enveloping : least-squares approximation techniques for

skin animation. In *Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation* (New York, NY, USA, 2002), SCA '02, ACM, pp. 129–138.

[WPP07] WANG R. Y., PULLI K., POPOVIĆ J. : Real-time enveloping with rotational regression. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 26, Num. 3 (2007).