Association Mouvement/Géométrie pour représentations volumiques

T. Jund[1] et A. Allaoui[1] et E. Darles[1] et X. Skapin[1] et P. Meseure[1] et A. Luciani[2]

[1]Université of Poitiers - CNRS UMR 7252- XLIM-SIC, France
[2]Laboratoire ICA, Université de Grenoble, France

Résumé

Les modèles particulaires permettent de produire des animations riches et variées. Ils sont particulièrement adaptés à certains effets d'animation. Mais intrinsèquement, ils ne sont pas basés sur des représentations surfaciques ou volumiques d'objets. Ainsi, visualiser le mouvement qu'ils décrivent peut poser problème car ils ne contiennent souvent pas assez d'information pour reconstruire la moindre topologie spatiale sous-jacente. Plus précisément, un mouvement produit par de tels modèles peut être rendu via différentes formes géométriques et mener à autant d'interprétations visuelles, sans contrôle de l'utilisateur. À notre connaissance, il n'existe pas de méthode générique associant des mouvements basés points, comme ceux produits par un modèle particulaire, ou n'importe quel ensemble de points en mouvement, à une structure topologique.
Dans cet article, nous proposons un "framework" permettant d'associer, selon les souhaits de l'utilisateur, n'importe quelle forme volumique à n'importe quel mouvement basé points, et de contrôler les changements topologiques.
Il est ainsi possible de créer différents résultats visuels avec une unique description de mouvement. Ce "framework" est séparé en trois processus distincts : l'association entre particules et sommets, la définition de l'application du mouvement aux sommets du maillage, et les modifications topologiques et les événements qui les déclenchent. Nous montrons comment la manipulation de ces paramètres permet d'expérimenter différentes associations sur un même mouvement.

1. Introduction

Depuis les débuts de l'animation par ordinateur, les techniques basées sur la physique ont exploité les modèles particulaires tels que ceux proposés par [LC84,MP89] pour animer des fluides visqueux et des objets déformables en collision. Malheureusement, ces modèles ne présentent pas de structure basée sur une topologie donnée et sont souvent difficiles à lier avec une visualisation.

Les méthodes d'animation basées sur la physique se sont donc tournées vers des représentations maillées des objets, comme les méthodes basées sur les éléments finis [TPBF87] ou les méthodes masses-ressorts [Pro95], pour résoudre ce problème.

Bien que les méthodes basées maillage produisent des animations impressionnantes, les modèles particulaires peuvent offrir plus de liberté et de versatilité. Par exemple, les méthodes basées maillage et les surfaces implicites ne gèrent pas facilement des formes présentant de nombreux changements topologiques et de très larges déformations. Dans ces cas, la modularité et la généricité des modèles particulaires ont prouvé leur pertinence [KANB03]. Utiliser un modèle particulaire ne requiert pas de définir la moindre topologie spatiale : l'organisation initiale des particules peut être utilisée pour définir la forme initiale à visualiser. Un mouvement est ainsi associée à une unique forme, que cette forme soit rendue par des techniques basées points [MKN*04], des surfaces implicites [DCG95] ou des maillages [MHTG05].

Cependant, établir une relation entre un ensemble de particules d'un modèle mécanique et une visualisation n'est pas forcément aussi direct. Pour proposer une approche flexible, susceptible de générer plusieurs habillages géométriques à partir d'un même mouvement, il est nécessaire de disposer d'une indépendance entre, d'une part, la forme initiale, l'application du mouvement à cette forme et les paramètres permettant de définir des changements topologiques, et d'autre part le modèle mécanique. Plus précisément, nous voulons définir les étapes requises pour créer une association entre une information cinétique basée points et des représentations volumiques, de manière à permettre cette souplesse.

Dans cet article, nous nous concentrons sur la formalisation des relations entre le mouvement d'un ensemble de points et un modèle géométrique maillé, ceci à travers la con-

© AFIG 2012, Association Française d'Informatique Graphique (http://asso-afig.fr)

ception d'une Association Mouvement/Géométrie (*AMG*). Notre principale contribution est de fournir des moyens flexibles de représenter et de contrôler l'évolution des maillages. En utilisant un représentation topologique volumique de la géométrie, nous pouvons : 1) facilement décrire des modèles géométriques avec leur structure interne, 2) modifier ces modèles, ce qui peut poser problème sans information topologique.

La section 2 présente les travaux partageant certaines thématiques avec cet article et résume leurs avantages et inconvénients dans notre contexte. La section 3 décrit les formalismes physiques et géométriques utilisés. La section 4 détaille notre proposition pour construire l'*AMG*. Considérant cette définition, une classification des autres travaux et des résulats expérimentaux sont donnés en 5. Les sections 6 et 7 presentent les travaux futurs et une conclusion.

2. Travaux précédents

De nombreux travaux considèrent les éléments physiques intrinsèquement liés à la représentation du maillage pour simuler le comportement d'un matériau [MG04] ou gérer des modifications topologiques [OBH02].

De telles méthodes fournissent à la fois la forme et la topologie des objets affichés. Les parties mécanique et visuelle sont ainsi similaires ou du moins très proches. Dans ce contexte, le contrôle de la topologie est assuré par des modification directes du maillage en remaillant le domaine physique [MBF04] ou en adaptant ses paramètres mécaniques [FDA05]. La solution habituelle consiste à placer un petit nombre de particules sur le maillage, dont les sommets sont alors animés par interpolation du mouvement des particules. La plupart des méthodes suivant ce principe utilisent la méthode du Shape-Matching. Cette idée a été introduite Müller et al. [MHTG05] pour simuler des déformations élastiques et a été étendue par Rivers et al. [RJ07] pour réduire les temps de calcul et obtenir des déformations plus douces et plus complexes. L'utilisation de particules orientées a aussi été proposée pour gérer des motifs singuliers des particules [MC11]. Ceci implique un lien fort entre la géométrie et le mouvement. Dans notre contexte, le mouvement est un point d'entrée et peut présenter un nombre de particules bien inférieur au nombre de sommets du maillage.

Lorsqu'aucune forme n'est donnée, des méthodes d'habillage automatique peuvent être utilisées. Les surfaces implicites ont d'abord été utilisées, notamment dans [CG93], car elles permettent intrinsèquement de gérer des changements topologiques [WMW86]. Une autre approche pour visualiser des modèles particulaires est d'utiliser une approche classique de reconstruction de surfaces [SWG08].

Dans ces deux méthodes, la proximité spatiale contrôle la topologie. Dans l'habillage par surface implicite, si deux particules sont proches, leur fonction potentielle et leur surface associée se mélangent.Dans [DCG95], Desbrun et al. étendent cette approche en utilisant un graphe de mélange pour éviter des mélanges non désirés et simuler des surfaces de contact précises entre les différents corps. Cependant, les surfaces implicites représentent très difficilement des formes présentant des arêtes vives.

À notre connaissance, aucun travail ne traite de l'Association Mouvement/Géométrie (*AMG*) pour les représentations volumiques. Ceci est dû au manque de représentation topologique robuste.

Dans ce papier, nous fournissons une description approfondie de l'association entre un mouvement prédéfini et une géométrie volumique. Nous identifions les paramètres nécessaires au contrôle de l'animation. Ces paramètres nous permettent de générer, à partir d'un unique mouvement, un panel d'animations dans le domaine visuel. Nous fournissons ainsi aux animateurs des outils pour créer de différents effets visuels en travaillant uniquement sur le modèle de contrôle et le modèle géométrique.

3. Formalismes et notations utilisés

Pour simuler le plus large panel de phénomène possible, nous recourons à une approche "bottom-up". Nous commençons par manipuler un ensemble d'éléments atomiques, tant dans le modèle physique que géométrique et construisons par itération successive des modèles de complexité croissante. La définition de l'*AMG*est donc fondée sur ces éléments atomiques, décrits ci-dessous.

3.1. Le formalisme physique

Nous utilisons le système CORDIS-ANIMA [LJF*91] pour générer des mouvements. En effet, ce système permet de modéliser des mouvements sans considérer une forme géométrique ou une représentation visuelle particulière. Il est donc adapté pour se trouver en amont du système d'habillage que nous proposons. Ce système modulaire et discret, basé sur le concept de réseau masses-interactions, est une implémentation en réseau cellulaire des principes newtoniens. Les concepts manipulés sont uniquement ceux de masse ponctuelle, force et action-réaction. Les connexions entre les éléments masses ponctuelles et les éléments interactions se font sans critère de contiguïté spatiale ou de proximité. C'est pourquoi il permet de concevoir des modèles de phénomènes dynamiques, non seulement visuels ou spatiaux, mais aussi acoustiques et haptiques. En animation, il permet la simulation de phénomènes tels que la plasticité, la friction ou les fractures [LG97]. Ainsi, il permet de produire des animations sans a priori sur une quelconque forme spatiale. Dans cet article, nous utilisons uniquement la description pas à pas des positions évoluant dans le temps. Mais nous pourrions recourir à des sources d'information cinématique complémentaires, issues de la capture de mouvement par exemple.

3.2. Le formalisme géométrique

Le modèle géométrique correspond au maillage en mouvement dont la topologie peut être modifiée en accord avec le mouvement amont. Le maillage peut provenir d'une source quelconque : il peut être généré à partir des positions initiales du mouvement ou extrait d'une source externe. Cependant, pour assurer une représentation rigoureuse de l'objet ainsi que sa consistance topologique, nous nous basons sur un formalisme topologique robuste. Ainsi, nous utilisons des

© AFIG 2012.

cartes combinatoires généralisées définis dans [Lie94] qui permettent de modéliser des quasi-variétés en dimension 2 et au delà. Notons que des modèles topologiques similaires ont été utilisées dans des simulations physiques pour traiter des opérations comme le collage, la découpe et plus généralement l'évolution du maillage [LT07].

Notre "framework" décrit n'importe quel objet comme une carte combinatoire, divisée en cellules topologiques (i.e. sommets, arêtes, faces et volumes). Chaque cellule est créée en assemblant des éléments topologiques atomiques, nommés "brins" dans la nomenclature des cartes généralisées. Les relations entre ces brins sont définis de telle sorte que récupérer les relations d'adjacence entre cellules de différentes dimension est rapide et robuste. La définition de ce formalisme assure aussi que, quelque soient les modifications topologiques appliquées, le maillage résultant est consistant.

Notons que nous manipulons directement une représentation volumique : une représentation surfacique ne permettrait pas d'identifier des trous internes au maillage et rétrécirait le champ de notre *AMG*.

Nous utilisons la librairie CGoGN [CGo] qui fournit une implantation solide et efficace de ce formalisme. Elle nous fournit également des outils pour manipuler la topologie, ainsi qu'un gestionnaire d'attributs permettant d'attacher n'importe quel type d'information (comme le plongement géométrique ou la couleur) sur chaque cellule.

4. Association Mouvement/Géométrie

L'*AMG* définit la manière d'associer le modèle géométrique au modèle physique. Plus précisément, nous appelons "association" l'ensemble des relations entre les particules et les cellules du maillage. Dans la suite, le terme "particules" désigne en fait les fonctions d'évolution 3D résultant de la simulation du système de particules (ou d'une autre source). Nous décomposons l'*AMG* en trois parties comme illustré en figure 1 : une association géométrique, une application du mouvement et la gestion des modifications topologiques. L'association géométrique définit quel sous ensemble de particules influence chaque sommet.L'application du mouvement définit comment le mouvement des particules est utilisé pour calculer les déplacements des sommets. Finalement, les modifications topologiques permettent de manipuler la structure du maillage et ainsi redéfinir l'association géométrique.

L'*AMG* initialise l'association géométrique pour exécuter l'application du mouvement. Cette opération est uniquement exécutée au départ de l'animation et après un changement topologique. La suite de cette section détaille ces trois étapes.

4.1. L'association géométrique

L'association géométrique associe chaque cellule (plus précisément les sommets de ces cellules) à un ensemble de particules. Symétriquement, on en déduit pour chaque particule une aire d'influence, selon les cellules auxquelles elle est associée.Cette opération repose sur un algorithme

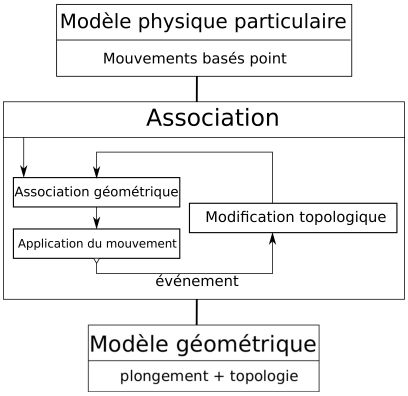


Figure 1: *Diagrammme décrivant l'association entre les modèles physique et géométrique.*

en deux étapes. La première étape définit une fonction de pondération telle que pour chaque paire (C_i, M_j), avec C_i une cellule topologique et M_j une particule, une valeur réelle est donnée. La seconde étape consiste à filtrer les cellules topologique C_i associées aux particules M_j, selon cette valeur. En d'autres mots, la première étape permet d'évaluer l'influence des particules sur les sommets, la seconde permet de limiter cette influence à des régions données. Le cas où chaque particule influence tous les sommets du maillage permet d'éviter le calcul de l'association géométrique. L'association géométrique est utilisée dans l'application du mouvement et dans les modifications topologiques.

4.1.1. Pondération

L'étape de pondération peut utiliser différents types de paramètres, géométriques, topologiques ou hybrides. Par exemple, une pondération géométrique consiste à associer chaque paire (C_i, M_j) avec une distance : plus C_i est éloigné de M_j, plus élevée (ou plus faible) est la pondération.

Différents types de pondération topologiques peuvent être définis. Ils suivent le principe de l'algorithme d'inondation-remplissage (appelé simplement inondation dans la suite), décrit ci-dessous.

Nous considérons une représentation topologique d'un maillage comme un graphe avec des nœuds correspondant à des cellules de dimension i ($0 \leq i \leq 3$) et des arcs correspondant à des relations d'adjacence entre deux cellules de dimension i par une cellule de dimension $j \neq i$.Si les nœuds sont des sommets et que les arcs sont des arêtes connectant deux sommets, nous obtenons la représentation classique des maillages.

Nous utilisons une telle représentation pour appliquer l'algorithme d'inondation, dont le principe est similaire à l'algorithme de Dijkstra. Il est donc nécessaire de définir une relation initiale pour déterminer quels nœuds du graphe sont les racines pour l'algorithme d'inondation. Par exemple, nous pouvons choisirs le(s) sommet(s) le(s) plus proche(s) d'une particule comme racine(s), ou tous les sommets d'un volume incluant une particule.

Après la définition de la relation initiale, un algorithme de

© AFIG 2012.

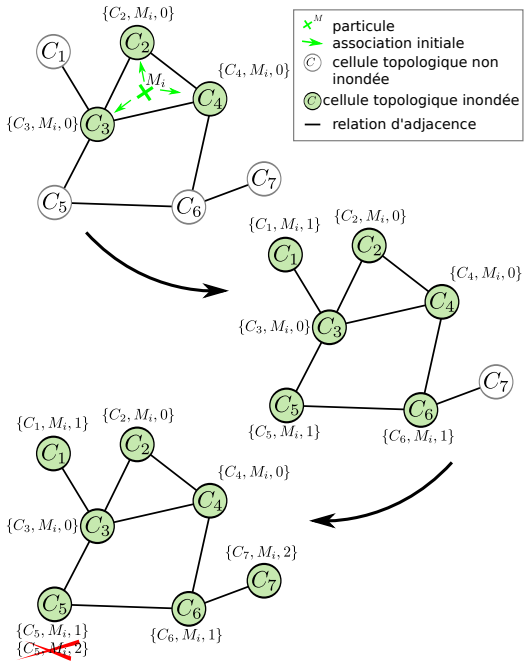


Figure 2: *Un algorithme d'inondation topologique : un poids est donnée à chaque cellule du graphe topologique selon sa distance à une particule. Un triplet $\{C_i, M_j, v\}$ représente le poids v associé à la paire (C_i, M_j).*

type Dijkstra est utilisé et les poids minimaux sont choisis chaque fois que des chemins différents mènent aux même nœuds. L'algorithme s'arrête dès que tous les nœuds ont été traités.

La pondération hybride est une variante intéressante à examiner. Le principe est le même que précédemment, mais les poids sont associés aux arcs et/ou aux nœuds selon un critère géométrique, comme le volume ou la courbure locale. Ceci permet à l'algorithme de favoriser une certaine région d'inondation.

La figure 2 illustre une pondération topologique pour une particule donnée sur un graphe représentant le maillage. Une fois que les racines ont été choisies, tous les nœuds connectés sont pondérés par leur distance à cette racine.

4.1.2. Filtrage

Une fois que tous les poids ont été définis pour chaque paire (C_i, M_j), ils sont multipliés par des coefficients assignés à chaque particule M_j.

Ces coefficients permettent à l'utilisateur de moduler l'influence de chaque particule et ainsi d'améliorer le contrôle sur le mapping géométrique comme illustré en figure 3. Finalement, nous assignons un sous-ensemble de l'ensemble des particules à chaque cellule C_i.

Ce sous-ensemble résulte d'une opération de filtrage basée sur les poids précédemment définis. Nous proposons les filtrages suivants :

– associer une cellule à une ou des particules caractérisées par un poids appartenant à un certain intervalle

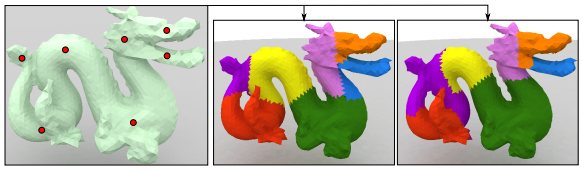


Figure 3: *Un modèle tétraèdrique contenant sept particules, montrées comme des points rouges sur la gauche. Une inondation topologique est utilisée, l'opération de filtrage gardant au moins une particule par sommet. Les résultats du filtrage sont montrés sur la droite : différentes pondérations des particules modifient l'association géométrique*

– spécifier le nombre de particules (toutes de poids minimum ou toutes de poids maximum)
– associer une cellule avec les particules de poids minimum ou maximum

Selon le type de filtre utilisé, les opérations de pondération n'ont pas besoin d'être accomplies intégralement. Le filtrage peut utiliser des critères permettant de raccourcir l'opération d'inondation. Dans les deux cas, le traitement global est sensiblement plus rapide. À l'issue de l'association géométrique, chaque sommet connaît les particules qui vont guider ses déplacements.

4.2. Application du mouvement

L'association géométrique vise à définir les ensembles de particules affectant chaque cellule du maillage. L'application du mouvement décrit comment les cellules sont déplacées en fonction des déplacements de leurs particules associées, d'un pas d'habillage au suivant. Le déplacement est défini à partir d'un pas de référence, qui peut être le pas initial ou le pas précédent.

Différents effets peuvent être créés selon la cardinalité des associations particules/sommet. Si une unique particule décrit le mouvement d'un ensemble de sommets, cet ensemble sera animé commme un bloc rigide en translation sans rotation. Lorsque plusieurs particules sont utilisées pour les déplacements, différentes approches peuvent être mises en œuvre comme l'homothétie, la rotation, le déplacement moyen, l'algorithme de Shape Matching [MHTG05], ou d'autres types d'interpolation.Selon le type de méthode, une matrice de transformation ou champ de déplacement est calculé pour déplacer les sommets concernés. Nous décrivons ci-dessous les différentes approches pour calculer les nouvelles positions des sommets du maillage au temps $t+1$ selon les positions précédentes des particules. Leur diversité nous permet d'imiter un certain nombre de méthodes trouvées dans la littérature. Dans la suite, nous notons $\mathbf{x}^t$ et $\mathbf{m}_j^t$ les positions respectives d'un sommet du maillage et d'une particule j au temps t.

4.2.1. Calculer une matrice de transformation

Les méthodes comme le Shape-Matching proposent de calculer une matrice de transformation basée sur la comparaison entre un pas de référence et le pas courant. Le Shape-Matching consister à minimiser l'erreur des moindres carrés

© AFIG 2012.

mouvants (Moving Least Squares). Le principe de calcul de l'erreur est exprimé en équation 1. La rotation optimale R est calculée en utilisant la matrice de covariance et les rotations de Jacobi. La translation T est établie comme le vecteur entre le barycentre de la forme de référence et le barycentre de la forme courante.

$$v_i^t = \mathbf{m}_i^t - (\sum_{i=1}^{N} \mathbf{m}_i^t)/N$$
$$\varepsilon(R,T) = \sum_{i=1}^{N} \|\omega_i(v_i^t - (Rv_i^r + T))\| \quad (1)$$

Dans l'équation 1, v_i^t est un vecteur défini par $\mathbf{m}_i^t$ et le barycentre de l'ensemble de particules au temps t, et v_i^r le même vecteur au pas de référence. Le paramètre ω_i est utilisé pour pondérer les différentes particules selon leur importance dans le mouvement. Une matrice de transformation est calculée pour chaque ensemble distinct de particules induit par l'association géométrique.

4.2.2. Calculer un champ de déplacement

Nous expliquons comment calculer un champ de déplacement pour un sommet en fonction du déplacement des particules associées. Le champ de déplacement est défini formellement comme suit :

$$\mathbf{x}^{t+1} = \mathbf{x}^t + D(\mathbf{x}^t) \quad (2)$$

où D est une fonction d'interpolation basée sur le déplacement, entre le pas de référence et le pas $t+1$, des particules associés à $\mathbf{x}$ au pas $t+1$. Lorsque le pas de référence est le pas initial, on retrouve les travaux de déformations de maillages [MHTG05, MQ07].

Différentes stratégies peuvent être adoptées :

Fonction moyenne : La stratégie la plus simple consiste à calculer la moyenne arithmétique des déplacements, indépendamment de $\mathbf{x}^t$.

$$D(\mathbf{x}^t) = (\sum_{i=1}^{N} \mathbf{m}_i^{t+1} - \mathbf{m}_i^t)/N \quad (3)$$

Lorque l'association géométrique sélectionne exactement une particule, nous appelons cette application "application directe".
Cette solution peut être améliorée en pondérant chaque déplacement :

$$D(\mathbf{x}^t) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \phi(\|\mathbf{m}_i^t - \mathbf{x}^t\|)(\mathbf{m}_i^{t+1} - \mathbf{m}_i^t) \quad (4)$$

où ϕ est une fonction décroissante de $\mathbb{R}^+$ dans $\mathbb{R}^+$, et chaque λ_i est calculé de manière à satisfaire l'équation 5.

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_i \phi(\|\mathbf{m}_i^t - \mathbf{x}^t\|) = 1 \quad (5)$$

Fonction barycentrique :

Cette stratégie est basée sur une association géométrique sélectionnant exactement 4 particules en dimension 3. Elle consiste en une moyenne pondérée où chaque $\mathbf{x}^t$ a les λ_i comme coordonnées barycentriques.

$$D(\mathbf{x}^t) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i(\mathbf{m}_i^{t+1} - \mathbf{m}_i^t) \quad (6)$$

Fonctions à base radiale :

Les interpolations basées sur les Fonctions à Base Radiale (RBF), définies dans [Mic86] pour la reconstruction de surfaces, ont été utilisées en déformation de maillage par points de contrôle dans [BK05]. Nous utilisons cette méthode pour calculer un champ de déplacement.

Trois champs scalaires de déplacement D_0, D_1 et D_2 sont définis pour chaque axe de l'espace 3D. L'équation pour l'axe i (avec $\mathbf{x}_i^t$ désignant la i-ème coordonnée de $\mathbf{x}^t$) peut être écrite comme :

$$D_i(\mathbf{x}^t) = \sum_{j=1}^{N} \lambda_{j,i}\phi(\|\mathbf{m}_j^t - \mathbf{x}^t\|) + a_{j,0} + \sum_{k=1}^{3} a_{j,k}\mathbf{x}_k^t \quad (7)$$

Les fonctions gaussienne, "shifted log", quadratique et quadratique inverse sont utilisées comme fonctions ϕ avec différents résultats comme montré plus bas en figure 7. Pour le calcul des λ_j et des a_i, nous invitons le lecteur à se référer aux articles cités plus haut.

Selon le type d'association géométrique et le type d'application du mouvement, différents effets peuvent déjà être obtenus. La propriété d'influence locale ou globale change la manière dont la géométrie suit le mouvement. Cependant, ces paramètres seuls ne permettent pas de gérer les changements topologiques du maillage durant une animation.

4.3. Modifications topologiques

Pendant une simulation, l'évolution des particules peut mener à des changements topologiques. Nous mesurons les changements d'élongation sur les modèles physique ou géométrique pour identifier des événements entraînant des modifications topologiques. Aussitôt qu'un événement est détecté, des modifications topologiques spécifiques sont déclenchées, ce qui inclut l'ajout ou la suppression de volumes, la fusion ou la séparation de cellules topologiques, du remaillage local, de la subdivision, et d'autres. Lorsqu'une élongation est mesurée supérieure ou inférieure à un seuil sur une cellule, la sélection des cellules sur lesquelles les opérations topologiques doivent être appliquées est relativement évidente.

Au contraire, si une mesure est acquise sur le modèle

© AFIG 2012.

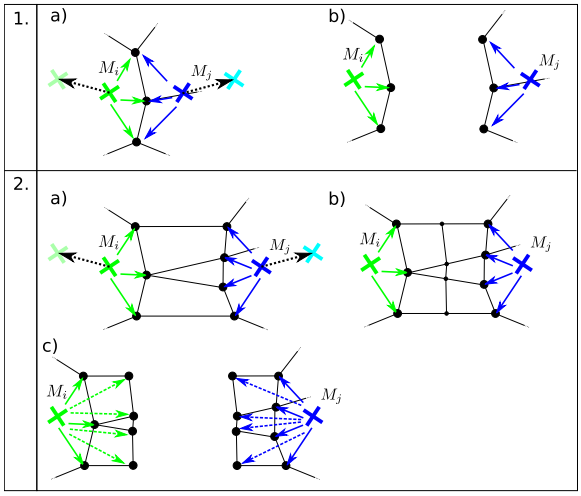


Figure 4: *Découpe d'une partie du maillage associée à deux particules le long d'une frontière "bien définie". Deux cas apparaissent : 1. La frontière suit les cellules ; 2. La frontière est située entre les celllules a) Avant modification ; 1.b) et 2.c) Après découpe (2.b montre l'étape de subdivision requise).*

physique, les cellules concernées doivent être sélectionnées à partir de l'association géométrique. Le reste de cette section concerne ce problème.

Après filtrage, comme décrit en section 4.1.2, certaines cellules peuvent être influencées par plusieurs particules. Nous devons déterminer quelles cellules sont concernées le type de modification topologique que l'on souhaite appliquer.Plus précisément, nous visons les cellules situées sur la frontière commune des régions d'influence de chaque particule.

D'abord, nous vérifions que la frontière est soit "bien définie", soit "mal définie". Considérons deux particules M_i et M_j, et G_i et G_j leurs graphes associés définis selon une des méthodes décrites en section 4.1.1. La frontière entre ces graphes est dite "bien définie" si : soit $G_i \cap G_j$ est un sous-graphe pour lequel il existe un chemin unique entre deux cellules (figure 4.1.a) ; ou $G_i \cap G_j = \emptyset$ et au moinns une paire de cellules $(C_i \in G_i, C_j \in G_j)$ sont topologiquement connectées (figure 4.2.a). La frontière est dite "mal définie" si : soit G_i et G_j se chevauchent, c'est-à-dire que $G_i \cap G_j$ est un sous-graphe pour lequel il y a deux différents chemins entre au moins une paire de cellules (figure 5.1) ; soit $G_i \cap G_j = \emptyset$ et il n'y a aucune cellule qui connecte directement G_i et G_j (figure 5.2).

Gérer un nouvel événement lorque la frontière est "bien définie" est relativement aisé, comme montré en figure 4 pour quelques opérations de découpe. S'il existe un unique chemin entre les cellules frontières (figure 4.1.a), des duplications de cellules sont opérées (figure 4.1.b). Sinon (figure 4.2.a), de nouveaux nœuds sont insérés sur les arcs influencés par M_i et M_j (figure 4.2.b). Ensuite, un algorithme d'inondation est exécuté, et la frontière peut être traitée comme dans le premier cas. Figure 6 montre différentes opérations de découpe de tétraèdres après détection d'une élongation sur les particules M_i et M_j. Les illustrations montrent tous les cas valides, c'est-à-dire lorsque tous les sommets sont associés à M_i et/ou M_j, et qu'il existe au moins deux sommets distincts respectivement associés à M_i et M_j. Nous montrons ici les cas typiques sur un tétraèdre, mais comme la visualisation n'est contrainte à aucune forme de volume, tous les polyèdres sont traités de la même manière. Un plan est défini selon la configuration des particules pour créer deux volumes distincts. La séparation peut passer par des sommets résultant d'une coupe d'arête et/ou par des sommets existants du volume. Une arête est coupé quand ses deux sommets sont associés l'un uniquement à M_i l'autre uniquement à M_j. La séparation passe par un sommet existant lorsque celui-ci est associé à M_i et à M_j.

Le cas simple, équivalent à la figure 4.1, n'est pas illustré. Il correspond à une face entre deux volumes dont tous les sommets sont associés à M_i et à M_j. Ce cas requiert uniquement de découdre les deux volumes par cette face.

La figure 5.1 montre des frontières "mal définies" entre des graphes associés au particules M_i et M_j. Si on détecte une élongation sur un tel couple de particule entraînant un changement topologique, une association géométrique avec des paramètres différents doit être exécutée pour pouvoir récupérer une frontière "bien définie".

Après une modification topologique, l'influence d'une particule sur le maillage peut changer. La mise à jour de l'association géométrique permet d'appliquer cette modification.

Les autres modifications topologiques comme le remaillage ou le collage peuvent être traitées de manière similaire.

5. Discussion

Dans cette section, nous présentons quelques résultats et nous comparons notre "framework" avec des associations existantes entre modèles particulaires et modèles géométriques. Ces associations sont souvent guidées par les contraintes de l'application du mouvement. En effet, comme indiqué dans la section 4.2, les rotations, homothéties et autres déformations ne peuvent être exprimées que sur la base du mouvement d'un certain nombre de particules. Nous proposons ensuite une évaluation des coûts des différentes étapes de notre "framework".

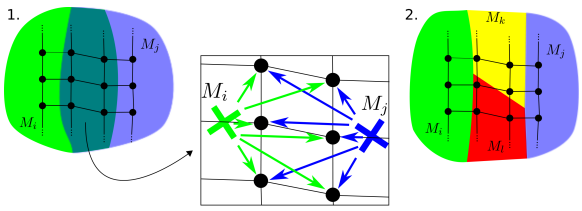


Figure 5: *Frontières "mal définies" entre deux particules M_i et M_j associées aux cellules. 1) Graphes se chevauchant 2) Bien que les deux graphes associés à M_i et M_j soient distincts, ils sont connectés par d'autres cellules, qui peuvent être associées aux autres particules M_k et M_l.*

© AFIG 2012.

Method	Association			Topologique Evénements
	Géométrique		Mouvement	
	Inondation	Filtrage		
Point-based animation of elastic, plastic and melting objects [MKN*04]	Géométrique	basé distance	Shape-matching	Non
Meshless animation of fracturing solids [PKA*05]	Topologique	basé distance	Shape-matching	Oui
Meshless deformations based on shape-matching [MHTG05]	Topologique	Conserve les particules dans un volume	Shape-matching	Non
Position based dynamics [MHHR07]	Géométrique	Une particule par sommet	Directe	Oui
Fastlsm : fast lattice shape matching for robust real-time deformation [RJ07]	Géométrique	basé distance	Shape-matching	Oui
SOFA an Open Source Framework for Medical Simulation [ACF*07]	Géométrique	Conserve 4 particules non planaires	Barycentric	Oui
Fast adaptive shape matching deformations [SOG08]	Géométrique	basé distance	Shape-matching	Oui
Meshless modeling of deformable shapes and their motion [AOW*08]	Topological	Conserve au moins 4 particules non planaires	Shape-matching	Non

Table 1: *Classification des méthodes existantes, considérant l'association géométrique, l'application du mouvement et la gestion des modifications topologiques.*

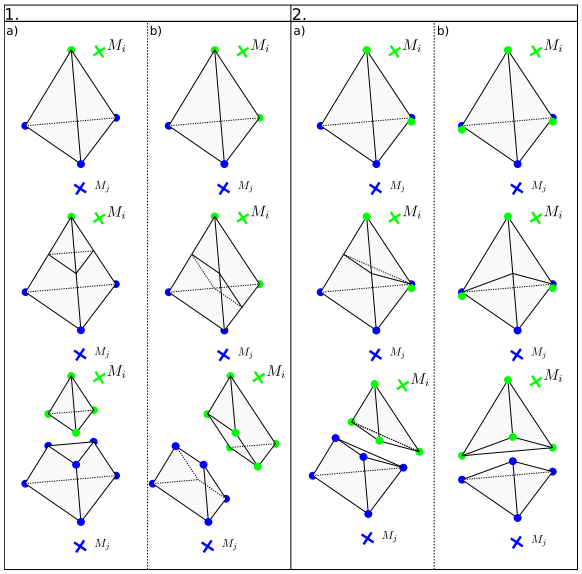


Figure 6: *1. Découpe d'un volume présentant une frontière "bien définie" séparée par des arêtes uniquement 2. Découpe d'un volume présentant une frontière "bien définie" séparée par des arêtes et des sommets. Les points verts et bleus représentent l'association entre particules et sommets.*

En se basant sur notre définition de l'*AMG*, nous distinguons plusieurs groupes de méthodes selon les critères suivants :

- l'équivalent de la pondération et des algorithmes de filtrage ;
- le type d'application du mouvement ;
- la possibilité de gérer des changements topologiques ;

Le tableau 1 résume notre classification de quelques méthodes existantes en utilisant ces paramètres. Comme illustré dans la figure 7, changer les paramètres de l'*AMG* pour un unique mouvement permet de créer plusieurs comportements de déformation. Ainsi, la manipulation des paramètres de l'*AMG* donne la possibilité de créer différents effets de matériau.

Nous illustrons ce principe sur la figure 8. Ces effets peu-

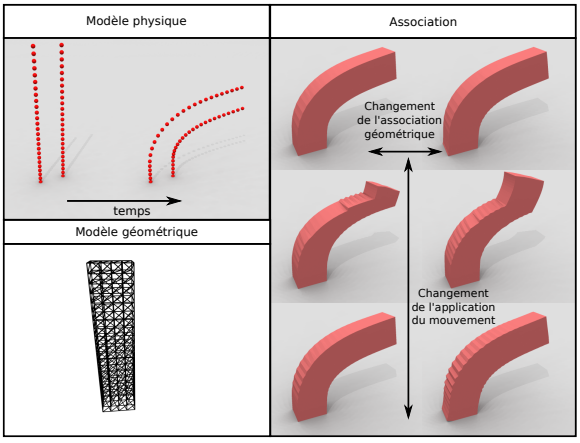


Figure 7: *En haut à gauche : le modèle physique. En bas à gauche : le modèle géométrique. A droite : un pas d'une animation basée sur 40 particules illustrant l'*AMG*. Colonne de gauche : inondation topologique, gardant au moins 10 particules. Colonne de droite : inondation topologique, gardant au moins 24 particules. Première ligne : RBF avec fonction gaussienne. Deuxième ligne : RBF avec fonction spline. Troisième ligne : fonction moyenne.*

© AFIG 2012.

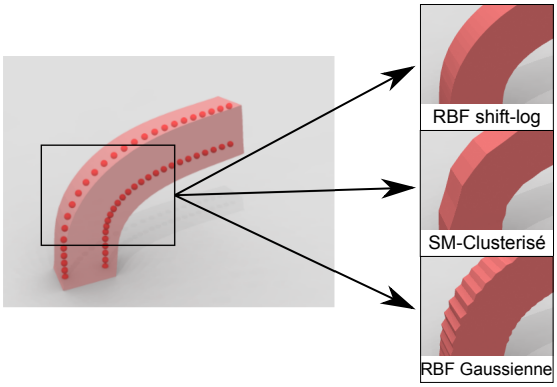


Figure 8: *Détails de l'effet de différents paramètres d'application du mouvement sur la même source de mouvement.*

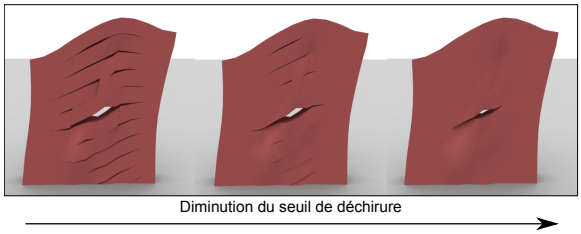


Figure 9: *Détails de l'effet de différents paramètres de modification topologiques sur la même source de mouvement.*

vent reposer sur l'association géométrique.Dans l'exemple en bas à droite, une fonction radiale gaussienne est utilisée avec le RBF pour créer des plis sur le maillage de manière éparse. Dans l'exemple du milieu à droite, le Shape-Matching est utilisé avec une association géométrique localisée, ce qui crée un effet de segmentation. Toujours sur la même animation, d'autres fonctions radiales, comme le "shifted log", définit une interpolation plus lissée illustrée dans l'exemple en haut à droite. La figure 9 montre l'effet de différentes modifications topologiques sur une déchirure de maillage hexaédrique. La modification du seuil de déchirure permet ici de produire différentes animations basées sur le même mouvement. Les figures 10 et 11 montrent des exemples de fractures externes et internes sur un maillage tétraédrique.

Dans l'objectif d'évaluer la performance de notre "framework" pour créer une animation, nous évaluons séparément le coût de chacun des composants de l'*AMG* . En prenant en compte l'ensemble de l'animation, l'application du mouvement est le processus qui requiert le plus de calcul. Le besoin d'une mise à jour complète de l'association géométrique, dû à un nombre indéterminé de modifications topologiques, est relativement rare. La plupart des changements à accomplir sur l'association géométrique peuvent être faits de manière locale et à moindre coût. Les temps de calcul sont mesurés sur ordinateur de bureau standard en utilisant un seul cœur.

En examinant l'initialisation de l'association géométrique, une distinction doit être faite entre distance géométrique et distance topologique. Une inondation géométrique a une complexité en $\mathcal{O}(CM)$, avec C le nombre

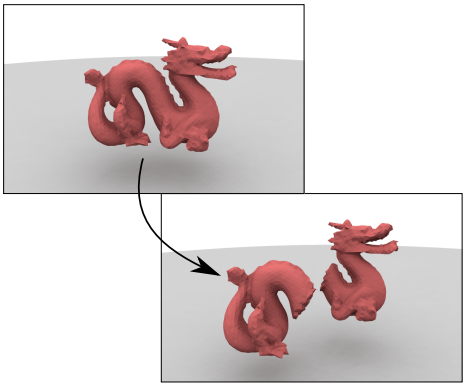


Figure 10: *Fracture d'un dragon représenté par un maillage tétraédrique.*

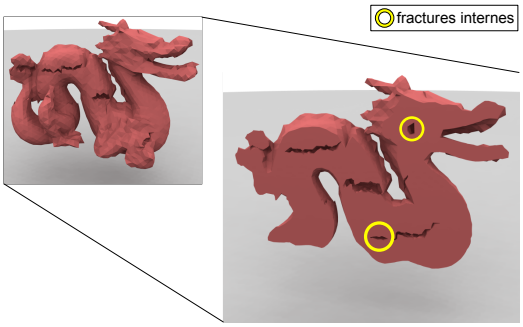


Figure 11: *Fractures internes sur un maillage volumique.*

de cellules topologiques et M le nombre de particules représentant le mouvement. Cependant, l'utilisation d'une inondation topologique dépend de plusieurs variables. En effet, selon le filtrage, des optimisations peuvent être proposées. Dans le pire des cas, la complexité est celle de l'algorithme de Dijkstra, donc en $\mathcal{O}(C^2M)$. En considérant un maillage de 100 000 cellules topologiques et un mouvement de 8 particules, l'association géométrique prend approximativement 0.2 secondes avec une distance géométrique et 3.5 secondes avec une inondation topologique. Le coût d'une inondation topologique est plus important s'il inclut la récupération des relations de voisinage. Cette étape représente jusqu'à 60% du processus d'inondation topologique et peut être stocké (et mis à jour localement si nécessaire) durant l'animation pour d'autres utilisations.

Le coût de l'application du mouvement dépend en partie de l'association géométrique. Les fonctions moyenne et barycentrique ont un coût relatif au nombre de sommets dans le maillage. Cependant, même si le Shape-Matching et le RBF requièrent des calculs plus complexes, ils peuvent être exécutés une fois par groupe de sommets partageant la même association. Le coût des modifications topologiques est négligeable par rapport aux autres calculs. Cependant, elles impliquent de mettre à jour l'association géométrique pour préserver une configuration valide.

© AFIG 2012.

6. Perspectives

Nous avons présenté une méthode générale pour contrôler les relations entre mouvement et forme. Certains aspects doivent être améliorés pour élargir le champ de notre méthode. Notre structure principale est encodé par un carte combinatoire. Un extension de ce modèle est donné dans [KCB09] et pourrait être intégré dans notre "framework". La multirésolution hérite de la flexibilité et de l'efficacité de notre structure topologique. Son intérêt réside dans sa capacité à s'adapter à la complexité de la forme en fonction de la distance entre le point de vue et l'objet. Une définition robuste et générique de l'*AMG* gérant la multirésolution fait parti des poursuites de travaux envisagées.

Notre "framework" est basé sur une représentation volumique, ce qui implique un coût en mémoire élevé. Notre méthode est uniquement contrainte par les propriétés de convexité des polyèdres, afin de pouvoir identifier les relations d'inclusion entre volumes et particules. Dans ce contexte, le degré des polyèdres n'est pas important, ce qui nous permet d'envisager des algorithmes de simplification pour les représentations volumiques.

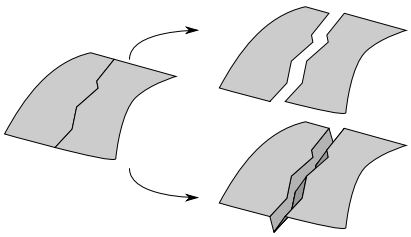


Figure 12: *Découture d'une surface : une surface peut représenter un maillage épais, ou le bord d'un volume plein. Dans le second cas, un remaillage doit être exécuté si la surface est déchirée ou coupée.*

Dans certains travaux, comme [MG04], un maillage surfacique est utilisé pour représenter des volumes pleins. Lorsqu'une opération topologique est appliquée au maillage, l'intérieur, qui était implicitement représenté, est alors maillé comme montré sur le bas de la figure 12. Cette méthode est compatible avec la nôtre : en effet, ce remaillage correspond à la création d'une structure interne qui est explicitement représentée dans un maillage volumique. Cependant, une représentation uniquement surfacique limiterait la définition de notre méthode d'inondation et empêcherait de représenter des structures internes.

Nous définissons l'association entre modèle physique et modèle géométrique. Cependant, si des collisions se produisent sur le modèle géométrique, aucun processus particulier ne peut prévenir des interpénétrations. Les méthodes classiques de détection de collision devront être intégrés pour traiter ce problème.

Tous nos exemples sont basés sur des modèles physiques avec peu de particules, nous voulons tester la robustesse de notre "framework" avec des configurations de plus complexes de particules.

7. Conclusion

Nous avons présenté une généralisation de l'*Association Mouvement/Géométrie* en définissant des relations entre un modèle physique particulaire et un modèle topologique. Une première association lie toutes les cellules du maillage à un ensemble de particules. Cette association est ensuite utilisée pour déformer le maillage et potentiellement changer la toplogie sous-jacente au modèle géométrique. Un ensemble réduit de paramètres permet de produire un large panel de résultats visuels.

Ces résultats peuvent être utilisés pour des analyses de perception d'animations, sur le modèle des études effectuées dans [BLAK12]. ou pour guider des créations en permettant de visualiser avec différentes formes la même information cinématique.

Références

[ACF*07] ALLARD J., COTIN S., FAURE F., BENSOUSSAN P., POYER F., DURIEZ C., DELINGETTE H., GRISONI L. : Sofa an open source framework for medical simulation. In *Medicine Meets VR* (2007), pp. 1–6.

[AOW*08] ADAMS B., OVSJANIKOV M., WAND M., SEIDEL H.-P., GUIBAS L. J. : Meshless modeling of deformable shapes and their motion. In *Symp. on Comput. Anim.* (2008), pp. 77–86.

[BK05] BOTSCH M., KOBBELT L. : Real-time shape editing using radial basis functions. In *Computer Graphics Forum* (2005), vol. 24, Citeseer, pp. 611–622.

[BLAK12] BENALLEGUE A. A., LUCIANI A., ALLAOUI A., KALANTARI S. : A cognitive analysis of the perception of shape and motion cooperation in virtual animations. In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception* (New York, NY, USA, 2012), SAP '12, ACM, pp. 130–130.

[CG93] CANI-GASCUEL M.-P. : An implicit formulation for precise contact modeling between flexible solids. In *SIGGRAPH* (1993), pp. 313–320.

[CGo] CGoGN : Combinatorial and Geometric modeling with Generic N-maps. http ://cgogn.unistra.fr.

[DCG95] DESBRUN M., CANI-GASCUEL M.-P. : Animation of soft substances with implicit surfaces. In *SIGGRAPH* (1995), Comput. Graph., pp. 287–290.

[FDA05] FOREST C., DELINGETTE H., AYACHE N. : Removing tetrahedra from manifold tetrahedralisation : application to real-time surgical simulation. *Med. Image Anal.. Vol. 9*, Num. 2 (2005), 113–122.

[KANB03] KACIC-ALESIC Z., NORDENSTAM M., BULLOCK D. : A Practical Dynamics System . *SCA* (2003), 7–16.

[KCB09] KRAEMER P., CAZIER D., BECHMANN D. : Extension of half-edges for the representation of multiresolution subdivision surfaces. *The Visual Comp.. Vol. 25*, Num. 2 (2009), 149–163.

[LC84] LUCIANI A., CADOZ C. : Modélisation et animation gestuelle d'objets - le système anima. *CESTA, 1er Colloque Image, Biarritz, France* (1984), 183–189.

© AFIG 2012.

[LG97] LUCIANI A., GODARD A. : Simulation of physical object construction featuring irreversible state changes. *Winter School of Comput. Graph. (WSCG)* (1997), 321–330.

[Lie94] LIENHARDT P. : N-dimensional generalized combinatorial maps and cellular quasi-manifolds. *Int. J. Comput. Geom. Appl.. Vol. 4*, Num. 3 (1994), 275–324.

[LJF*91] LUCIANI A., JIMENEZ S., FLORENS J., CADOZ C., RAOULT O. : Computational physics : a modeler simulator for animated physical objects. In *Eurographics* (1991), pp. 425–436.

[LT07] LINDBLAD A., TURKIYYAH G. : A physically-based framework for real-time haptic cutting and interaction with 3d continuum models. In *ACM Symp. on Solid and Phys. Model.* (2007), pp. 421–429.

[MBF04] MOLINO N., BAO Z., FEDKIW R. : A virtual node algorithm for changing mesh topology during simulation. *ACM Trans. Graph.. Vol. 23* (2004), 385–392.

[MC11] MÜLLER M., CHENTANEZ N. : Solid simulation with oriented particles. In *SIGGRAPH* (2011), pp. 92 :1–92 :10.

[MG04] MÜLLER M., GROSS M. : Interactive virtual materials. In *Graphics Interface* (2004), Canadian Human-Computer Commun. Soc., pp. 239–246.

[MHHR07] MÜLLER M., HEIDELBERGER B., HENNIX M., RATCLIFF J. : Position based dynamics. *Visual Commun. and Image Represent.. Vol. 18* (2007), 109–118.

[MHTG05] MÜLLER M., HEIDELBERGER B., TESCHNER M., GROSS M. : Meshless deformations based on shape matching. *ACM Trans. Graph.. Vol. 24*, Num. 3 (2005), 471–478.

[Mic86] MICCHELLI C. A. : Interpolation of scattered data : Distance matrices and conditionally positive definite functions. *Constructive Approximation. Vol. 2*, Num. 1 (1986), 11–22.

[MKN*04] MÜLLER M., KEISER R., NEALEN A., PAULY M., GROSS M., ALEXA M. : Point based animation of elastic, plastic and melting objects. *Symp. on Comput. Anim.* (2004), 141–151.

[MP89] MILLER G. S. P., PEARCE A. : Globular dynamics : A connected particle system for animating viscous fluids. *Computers & Graphics. Vol. 13*, Num. 3 (1989), 305–309.

[MQ07] MCDONNELL K. T., QIN H. : Pb-ffd : A point-based technique for free-form deformation. *Journal of Graphics Tools. Vol. 12*, Num. 3 (2007), 25–41.

[OBH02] O'BRIEN J., BARGTEIL A., HODGINS J. : Graphical modeling and animation of ductile fracture. *SIGGRAPH* (2002), 291–294.

[PKA*05] PAULY M., KEISER R., ADAMS B., DUTRÉ P., GROSS M., GUIBAS L. J. : Meshless animation of fracturing solids. In *SIGGRAPH* (2005), pp. 957–964.

[Pro95] PROVOT X. : Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. In *Graph. Interf.* (1995), pp. 147–154.

[RJ07] RIVERS A. R., JAMES D. L. : Fastlsm : fast lattice shape matching for robust real-time deformation. *ACM Trans. Graph.. Vol. 26* (2007), 82–es.

[SOG08] STEINEMANN D., OTADUY M. A., GROSS M. : Fast adaptive shape matching deformations. In *Symp. on Comput. Anim.* (2008), pp. 87–94.

[SWG08] SÜSSMUTH J., WINTER M., GREINER G. : Reconstructing animated meshes from time-varying point clouds. *Computer Graphics Forum (Proceedings of SGP 2008). Vol. 27*, Num. 5 (2008), 1469–1476.

[TPBF87] TERZOPOULOS D., PLATT J., BARR A., FLEISHER K. : Elastically deformable models. *SIGGRAPH* (1987), 205–214.

[WMW86] WYVILL B., MCPHEETERS C., WYVILL G. : Animating soft objects. *The Visual Computer. Vol. 2*, Num. 4 (1986), 235–242.

© AFIG 2012.