

**Christian Duriez**

Directeur de recherche INRIA  
Responsable de l'équipe DEFROST  
Parc Scientifique de la Haute Borne  
40, avenue Halley B.P. 70478  
59658 Villeneuve d'Ascq

Villeneuve d'Ascq, le 12 septembre 2016

Le manuscrit de thèse de Pierre-Luc Manteaux s'intitule « Simulation et contrôle de phénomènes physiques ». Il est constitué de 160 pages écrites en langue anglaise et structuré en 7 chapitres. Après le chapitre d'introduction, les deux premiers chapitres sont consacrés à l'état de l'art. Le chapitre 2 aborde les méthodes d'animation basées sur la physiques et leur contrôle alors que le chapitre 3 donne une vue d'ensemble des méthodes adaptatives utilisées en animation pour la simulation mécanique de solides déformables ou de fluides. Les trois chapitres suivants sont consacrés à des contributions développées durant la thèse de l'auteur. Le chapitre 4 présente une méthode adaptative permettant de restreindre le nombre de particules simulées quand leur mouvement est faible. le chapitre 5 s'intéresse à la découpe d'objets déformables dans un contexte où le temps de calcul est fortement réduit. Le chapitre 6 propose une nouvelle méthode de contrôle et de combinaison d'animations de fluides. Le manuscrit se termine par un dernier et 7ème chapitre de conclusion, donnant les pistes de travail pour des travaux futurs.

Le chapitre d'introduction présente le contexte de la thèse, l'animation basée sur la physique, avec, notamment, les liens avec la simulation mécanique et les spécificités liées à l'animation. Ensuite, les problématiques traitées dans la thèse: les méthodes adaptatives, les changements topologique et le contrôle de la simulation sont exposés rapidement pour situer les différentes contributions qui seront détaillées dans les chapitres suivants.

Le second chapitre fait un état de l'art sur l'animation basée sur la physique et son contrôle. Le chapitre commence par une description des principes fondamentaux de la mécanique des milieux continus (la conservation de la masse et de la quantité de mouvement, la mécanique Lagrangienne et Eulérienne) et aborde les problématiques d'intégration spatiale et temporelle. Ensuite, le focus est réalisé sur la mécanique des fluides et notamment la formulation SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) qui permet une approximation des équations de Navier-Stokes avec une vue Lagrangienne. Les simplifications utilisées et les problématiques associées sont bien décrites. Puis, un autre focus est fait sur mécanique des solides déformables, notamment les solides élastiques. Les aspects plus « pratiques », notamment ceux liés à la simulation sont évoqués, notamment l'utilisation du « *frame-based model* » et d'un framework multicouche (J'ai été surpris ici que le framework SOFA ne soit pas cité lorsqu'il est évoqué l'utilisation de *mappings* dans un framework multicouche !).

Le chapitre continue avec une présentation des méthodes de contrôle sur les animations. L'idée est de proposer des outils pour que l'auteur d'une animation puisse modifier facilement les paramètres d'une simulation physique afin d'obtenir un comportement souhaité. L'exemple de la balle qui rebondit est très parlant et intéressant (La problématique est similaire, me semble-t-il, à celle du papier « Backwards Steps in Rigid Body Simulation » de C. Twigg and D. James qu'on pourrait citer ici). Le problème se traduit sous la forme d'une optimisation sous contrainte plus ou moins complexe suivant la taille des modèles, la durée de l'animation, les paramètres, les contraintes. D'autres solution pour mixer animation et simulation sont ensuite décrites. Le chapitre se termine par le manque de méthodes d'édition dans les techniques d'animation existantes.

Ce chapitre propose une présentation volontairement rapide des modèles et simulations mécaniques qui permet de poser clairement les concepts et les équations. Les travaux et enjeux autour du contrôle de la simulation pour créer une animation sont aussi décrits de manière claire, mais j'aurais parfois aimé avoir un peu plus de détails, notamment sur la formulation mathématique de l'optimisation associée à la problématique du contrôle.

Le troisième chapitre aborde les techniques adaptatives qui ont pour but d'améliorer le compromis entre le temps de calcul et la précision des simulations physiques. Ce chapitre donne une description générale des travaux qui ont été développés dans ce domaine au sein de la communauté *computer*

*graphics*. Le chapitre structure l'état de l'art en distinguant les approches adaptatives temporelles, les techniques d'adaptation du support géométrique en les distinguant des autres méthodes d'adaptation spatiale.

Pour l'adaptation temporelle, le chapitre décrit les différentes contraintes qui peuvent exister sur le pas de temps utilisé dans la simulation pour intégrer les mouvements dynamiques (de solides déformables ou de fluides), avec notamment la condition de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). On regrettera peut-être que les contraintes sur le pas de temps liées à l'aspect *non-smooth* des contacts, ne soient pas aussi détaillées. On aurait pu notamment bien décrire les différences, avantages et inconvénients des méthodes time-stepping (qui sont exposés) par rapport aux méthodes event-driven (peu présentées en comparaison). Les intérêts et les difficultés d'adapter le pas de temps d'une simulation sont bien exposés. Suivant la rapidité de variation de différents phénomènes physiques simulés, on peut imaginer d'utiliser différents pas de temps ou encore on peut geler le calcul sur certains degrés de libertés pendant plusieurs pas de temps si ils ne bougent pas ou ne modifient pas leur mouvement. Les problématiques de conservation de l'énergie ou de la quantité de mouvement par ces schémas d'adaptation temporelle sont évoqués et discutés au fur et à mesure de la description des méthodes.

Sous le titre d'adaptation géométrique, l'auteur regroupe l'ensemble des méthodes qui proposent une discrétisation spatiale adaptative en modifiant (raffinement ou déraffinement) la discrétisation du support géométrique du modèle. La question du critère utilisé pour lancer (ou non) le remaillage est évoqué suivant les cas d'utilisation: mesure de déformations sur un solide élastique, problématique de la fracture. Des critères non mécaniques, plus orientés vers les problématiques du domaine *Computer Graphics* sont présentés, comme la distance à la caméra ou le peu de visibilité de certaines régions dans une simulation de fluide. Différentes méthodes proposant des adaptations de maillage ou de grille - structurée ou non-structurée - pour la simulation de solide -ou de liquide - sont présentées. Dans cette partie, qui présente de nombreux travaux en les classant par types de support géométrique, on regrettera peut-être un manque de mise en relief des enjeux et une différenciation des problématiques suivant le type de simulation. Les techniques d'adaptation sur des modèles sans maillage sont ensuite décrites, avec l'intérêt de pouvoir adapter dynamiquement l'échantillonnage spatial plus facilement. Malgré tout, il reste des défis autour de la gestion des discontinuités (comme les bords d'une fracture) et de ne pas avoir d'artefacts lors des changements de résolution.

La troisième partie du chapitre est consacré à une description de différentes techniques d'adaptation du calcul non basées sur la géométrie. L'idée est principalement d'adapter la bases des fonctions de support du modèle (qui permette l'interpolation) en les enrichissant. Dans ce domaine les méthodes basées sur le raffinement de la base polynomiale sont sans doute les plus connus, mais on trouve aussi d'autres techniques, comme les XFEM qui permettent d'introduire des fonctions spécifiques pour gérer les problèmes des discontinuités évoquées plus haut. Des techniques de réduction de modèles adaptatives sont aussi décrites: on adapte dynamiquement la base des modes de déformation ou on ajoute des degrés de libertés locaux pour gérer des événements comme la collision. Enfin, des travaux sont présentés sur l'utilisation de grille de calcul repositionnable ou sur l'utilisation de représentation mixte (comme par exemple le fait de mélanger deux représentations Lagrangienne avec une Eulérienne dans un même modèle).

Ce chapitre, qui est le plus long de la thèse, est issu d'un article d'*overview* publié dans la revue *Computer Graphics Forum*. L'état de l'art est exhaustif et donne une bonne vue de l'ensemble des méthodes adaptatives utilisées dans le domaine *Computer Graphics*. En revanche, on perd parfois un peu le lien avec le reste de la thèse, et notamment les enjeux des contributions présentées dans les chapitres suivants.

Le quatrième chapitre décrit une extension de la méthode « *Adaptively Restrained Particle Simulation* » à la modélisation de fluides par SPH et à la simulation de vêtement. La méthode est basée sur une formulation hamiltonienne restreinte de l'énergie du système: suivant le niveau de quantité de mouvement portée par chaque particule, on peut choisir de l'activer, la désactiver ou la faire passer par un état transitoire. L'idée est de gagner du temps de calcul pour les cas où un grand nombre de particules du système ne sont pas en mouvement, mais sans perdre des propriétés importantes, comme la conservation de la quantité de mouvement. La méthode a été initialement développée par Artemova et Redon. L'extension pour les fluides SPH est assez directe puisque la formulation utilise une intégration temporelle explicite qui permet de faire le calcul indépendamment sur chaque particule. En revanche, il est constaté que les forces de viscosité peuvent perturber la méthode: soit on base le calcul sur la vitesse simulée des particules, mais dans ce cas, l'activation et la désactivation des particules perturbe le calcul ; soit on base le calcul des force sur l'expression de la quantité de mouvement (qui peut changer même pour les particules inactives), et dans ce cas les seuils pour désactiver la particule ne sont jamais atteints (on converge vers ce seuil sans l'atteindre). Un nouveau critère basé sur la vitesse est alors introduit. Cependant il aurait été intéressant de mieux comprendre pourquoi on converge vers le seuil sans jamais l'atteindre. Cela ne m'a pas semblé évident.

La méthode est ensuite étendue pour des objets déformables plus « raides » en utilisant une intégration temporelle implicite. Cette extension est moins directe puisque l'intégration de la quantité de mouvement se fait à l'aide de forces calculée à la fin du pas de temps. C'est donc un système non-linéaire que l'on obtient et que l'on va résoudre une succession de systèmes linéarisés. Une des nouveautés de la méthode est de ne pas désactiver complètement les particules mais plutôt de proposer une intégration explicite sur les particules dont la quantité de mouvement est faible et de ne garder l'intégration implicite (donc coûteuse) que sur un sous-ensemble de particules.

Ce chapitre est clair mais un peu court. On aurait pu imaginer un peu plus de détails sur la formulation ainsi qu'une analyse et une validation plus approfondie. Il faut noter que la méthode a l'avantage d'être facile à implémenter et que l'extension proposée à une intégration implicite pourrait rendre son utilisation plus large.

Le cinquième chapitre présente une méthode adaptative de simulation de découpe basée sur le modèle meshless de *frame* (6 degrés de libertés par noeud) développée par Gilles *et al.* Cette technique vise à proposer une simulation de la découpe réaliste lorsque les temps de calculs sont fortement contraints en utilisant un nombre de noeuds très réduit. La description de l'état de l'art sur les méthodes de découpe et fracture utilisées en computer graphics permet de retenir l'idée de séparer le modèle physique du modèle visuel (*embedding method*) pour tenter d'avoir le meilleur compromis entre la qualité du rendu visuel et la faible complexité du modèle physique. Cette idée sera utilisée dans la méthode proposée.

L'approche consiste à faire évoluer le moins possible le nombre de noeuds du modèle, mais de calculer la découpe sur une grille qui sert de support au maillage visuel et de transférer cette découpe au modèle mécanique par une modification des fonctions de forme. Ces fonctions de forme sont calculés sur une grille non-manifold de manière à garder l'ensemble des informations topologiques liées à la découpe. On trouve une description de l'algorithme de création de cette grille, ainsi qu'une explication des choix ayant amené à l'utilisation d'une telle structure de données. L'intérêt est de pouvoir calculer les fonctions de forme à partir de la distance géodésique en tenant compte des découpes mais aussi de pouvoir détecter des parties isolées sur lesquels il faudra remettre des degrés de liberté mécanique. Les parties isolées ne sont pas le seul cas où on souhaite ajouter des frames: lorsque l'objet est découpé il se peut que la fonction de forme d'une région entière soit portée par une frame unique. Un système de seuil sur les valeurs de fonction de formes dans ces régions permet de décider de l'ajout de *frames* supplémentaires. Les résultats obtenus sont visuellement très réalistes avec des temps de calcul rapide, ce qui est clairement l'objectif affiché. On aurait pu essayer d'avoir une validation plus complète en comparant les résultats mécaniques avec des simulations basées sur des maillages détaillés, mais les simulations réalisées démontrent clairement le grand potentiel de cette méthode.

Le sixième chapitre s'intéresse au contrôle d'animations de fluides. Le contexte est ici de donner des moyens concrets à un artiste souhaitant créer une séquence réaliste dans laquelle des fluides sont en mouvement. Or, si on s'en tient à la réalisation d'une séquence basée sur la physique, les paramètres mécaniques pour faire évoluer la séquence sont complexes à manipuler. Par ailleurs, le temps de calcul est long et ne permet pas d'avoir une approche « interactive ». La proposition est donc de se baser sur une banque de séquences représentant différentes simulations de fluides et de pouvoir les copier, éditer, coller dans une autre séquence tout en s'adaptant au nouveau contexte. Si la proposition est simple à comprendre du point de vue de l'utilisateur, plusieurs étapes demandent des méthodes et algorithmes non-triviaux: l'extraction semi-automatique de *features* spatio-temporelle d'une séquence en entrée, une représentation générique de ces *features* qui soit indépendante de l'animation originale et les outils d'éditeurs à la disposition de l'utilisateur. Pour l'extraction semi-automatique, la détection est basée sur une analyse de la courbure du maillage en entrée suivie d'un filtrage de la topologie (érosion, dilatation). Ces outils permettent de sélectionner une région d'intérêt. Il faut ensuite agréger dans les séquences suivantes et précédentes le comportement de la même région (avec potentiellement des maillages non cohérents). Ce processus, entièrement automatique est réalisé à l'aide d'une méthode d'optimisation basée sur des critères géométriques.

Pour la représentation des *features* il faut surtout être capable de s'extraire de la représentation de la séquence initiale. On construit donc un nouveau maillage en trois étapes: un lissage, le calcul d'un champ de déplacement sur les points du maillage d'entrée, et une interpolation linéaire sur une texture (rasterization) qui pourra être insérée sur le nouveau maillage.

Plusieurs outils ont été développés et sont à la disposition de l'utilisateur pour éditer la séquence (copier, couper, coller, déformer la séquence en espace et en temps, apparition graduelle, édition de la trajectoire). Les résultats obtenus sont visuellement très intéressants et démontre une utilisation qui semble intuitive, même si le chapitre se termine par une liste de limitations qui montre aussi le recul et l'analyse de l'auteur sur sa méthode.



Le dernier chapitre fait un résumé des contributions et donne des perspectives de travaux futurs pour les différentes contributions de cette thèse.

C'est donc un travail de thèse très varié qui est exposé dans ce document. Les trois principales contributions n'ont pas de rapport direct entre eux, même elles sont toutes du domaine de l'animation physique en *computer graphics*. Le manuscrit peine parfois à donner de l'unité à l'ensemble mais chaque contribution est intéressante. On regrettera peut-être que l'état de l'art soit aussi détaillé alors que les chapitres de contribution sont un peu courts et laisse parfois le lecteur sur sa faim, notamment en terme de validation. Cependant, d'une manière générale, le manuscrit reste très pédagogique et agréable à lire et il témoigne de la très bonne connaissance et analyse du domaine par Pierre-Luc Manteaux. On imagine aussi que le travail de développement a été très conséquent sur cette thèse. Les résultats sont souvent illustrés par des exemples variés et les vidéos proposées permettent de mieux comprendre les méthodes et d'en montrer leur potentiel.

Pour toutes ces raisons, je suis très favorable à la présentation des travaux de recherche de Pierre-Luc Manteaux en vue de l'obtention du grade de docteur de la Communauté Université Grenoble Alpes.

**CENTRE DE RECHERCHE  
LILLE - NORD EUROPE**

Parc scientifique de la Haute-Borne  
40 avenue Halley - Bât A - Park Plaza  
59650 Villeneuve d'Ascq - France  
Tél. : +33 (0)3 59 57 78 00  
Fax : +33 (0)3 59 57 78 51

[www.inria.fr](http://www.inria.fr)

A handwritten signature in black ink, reading "Duriez", with a large, sweeping initial "D" that extends above the line.

Christian Duriez