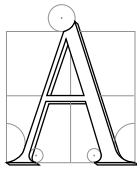

Conclusion



PRÈS avoir décrit dans ce mémoire les différentes pistes de recherche que nous avons suivies, nous souhaitons dans ce chapitre dresser un bilan du travail réalisé durant cette thèse. Nous en résumerons les différentes contributions, pour ensuite dégager des pistes de recherche futures. Nous pourrons alors conclure et replacer ce travail dans un cadre plus général.

Résumé des contributions

Nous avons, lors de cette thèse, cherché à tirer parti de la multirésolution pour animer en images de synthèse les déformations d'objets mous. L'application principale de ces travaux, liée au caractère temps-réel de notre simulation, est principalement la mise au point d'un simulateur pédagogique de chirurgie laparoscopique.

Après avoir inventorié les techniques existantes et détaillé leur adéquation à nos buts, nous avons décrit le formalisme utilisé par les physiciens pour décrire un matériau continu. Ce formalisme permet en effet, grâce à sa relative indépendance à la discrétisation de l'objet, d'envisager une simulation multirésolution. Il faut pour cela pouvoir calculer, sur une grille arbitraire, la valeur d'opérateurs différentiels du second ordre qui donnent l'expression de la force subie par chaque particule en fonction des déformations de l'objet.

Premier modèle adaptatif

Nous avons pour cela mis au point un premier modèle multirésolution adaptatif. Le calcul des opérateurs était basé sur une extension en 3D des formulations issues des développements de Taylor 1D exprimés sur des points non régulièrement répartis.

Relativement insensibles à la discrétisation, ces opérateurs ont ensuite été utilisés dans un algorithme adaptatif basé sur une découpe en octree de l'espace. Les résultats visuels obtenus avec cette méthode sont assez convaincants, mais la méthode pêche mathématiquement, l'un des opérateurs étant incomplet.

Nouveaux opérateurs différentiels

Aussi avons-nous ensuite cherché à mettre au point de nouveaux opérateurs différentiels, cette fois ci basés sur des considérations géométriques (régions de Voronoï autour des particules) et mathématiques (utilisation du théorème de Gauss) plus pointues. Les démonstrations formelles de l'expression des opérateurs ont été suivies d'interprétations intuitives et géométriques de leur signification et de leur comportement.

Nous avons, en particulier, pu montrer l'équivalence de cette méthode avec celle des éléments finis linéaires dans le cas 2D, ce qui apporte un éclairage nouveau sur cette méthode. Ce rapprochement a permis d'établir que

le tenseur des éléments finis comportait des termes inutiles se compensant dans les calculs, probables sources de bruit et d'instabilités.

La comparaison en 3D a quand à elle montré la très grande ressemblance des deux modèles, leur légère différence n'expliquant pas le comportement divergent du terme de préservation de volume de la méthode. Nous avons par contre, inspirés par la formulation obtenue à partir de l'utilisation de Gauss et Voronoï, développé un formalisme d'éléments finis hybride novateur.

Nous terminons cette étude par une comparaison générale de différents modèles utilisés en animation. Apparaît alors l'intérêt de cette version hybride scalaire, ce modèle étant celui offrant la plus grande indépendance à la résolution.

Modèle multirésolution hiérarchique

Nous proposons alors un second modèle multirésolution, hiérarchique cette fois ci. Celui-ci s'appuie sur la cohabitation à tout instant de plusieurs maillages *indépendants*, animés grâce aux opérateurs précédemment décrits.

Chaque zone de l'objet est réellement simulée par un et un seul maillage, celui-ci étant choisi pour offrir le meilleur compromis entre qualité visuelle et temps de calcul. Les différents maillages qui composent l'objet peuvent néanmoins *communiquer* grâce à l'introduction de points fantômes servant d'interface, afin qu'ils forment un tout unifié.

Ces travaux ont permis la réalisation d'un prototype de simulateur chirurgical hépatique garantissant le temps-réel vrai. La liaison entre le modèle physique multirésolution et la surface de l'objet se fait par interpolation des positions des particules internes. Elle permet un affichage de qualité de la surface de l'organe, celle-ci répondant aux sollicitations de l'outil virtuel. Le retour d'effort, basé sur les valeurs physiques du modèle interne, permet d'augmenter sensiblement le réalisme du simulateur.

Travaux futurs

Aux quelques réponses et avancées apportées par cette thèse reviennent en écho de nouvelles interrogations, inhérentes à tout travail de recherche. Quelques améliorations pratiques peuvent être envisagées, comme la simulation des découpes de l'objet. La multirésolution pour un système dynamique pose quand à elle un problème de fond, qui s'est révélé ardu à mettre en œuvre.

Améliorations du modèle

Les travaux proposés visaient à la mise au point d'un modèle déformable temps-réel utilisable au sein d'un *prototype* de simulateur chirurgical. L'objectif est atteint, mais de nombreuses améliorations peuvent être apportées. Nous ne parlerons même pas des optimisations pouvant accélérer la simulation ou des modifications esthétiques du simulateur qui ne font pas directement partie de ce travail de recherche.

Le modèle multirésolution hiérarchique présenté au Chapitre 5 peut probablement être amélioré. Les choix arbitraires qui ont parfois été faits en raison de leur adéquation intuitive à nos buts (interpolations linéaires généralisées, octree non restreint) peuvent éventuellement être remis en cause.

Il peut arriver que le nombre de triangles composant la surface soit un facteur limitant, leur affichage prenant trop de temps. On pourra alors utiliser des niveaux de détails géométriques de la surface et il peut être intéressant d'essayer de les lier aux niveaux de détails du modèle physique. Les mouvements les plus subtils bénéficieront ainsi d'un rendu adéquat.

L'interface avec l'utilisateur peut également bénéficier d'améliorations sensibles. Si la détection des collisions semble bien traitée par l'algorithme utilisant le rendu *offscreen*, la *réponse* aux collisions peut encore poser problème. Lorsque l'outil est de grande taille il est très difficile de savoir comment déplacer les points

de la surface pour les sortir de façon naturelle de l'outil. Ce problème ne se pose pas trop dans le cadre d'une application chirurgicale, mais reste à régler si l'on souhaite utiliser cette technique à d'autres fins.

Le retour d'effort est également perfectible. Les possibles vibrations ou discontinuités que l'utilisateur peut ressentir détruisent en effet grandement le sentiment d'immersion que celui-ci aurait pu avoir. Il convient donc de consacrer beaucoup d'attention à ce problème, ce qui engendrera probablement des calculs supplémentaires.

L'intégration temporelle des forces calculées est encore trop sensible. Il est impressionnant de constater combien un pas de temps d'intégration donné conditionne les raideurs maximales permises. Le passage d'une animation inconditionnellement stable à une divergence immédiate se faisant lors d'une augmentation de quelques pour cent des coefficients.

Ce phénomène est particulièrement sensible lorsque l'on cherche à augmenter les forces dissipatives à l'intérieur de l'objet pour le rendre moins oscillant. Nous avons imposé que ces forces ne puissent pas accélérer une particule ou inverser sa vitesse. Le seuil de divergence s'en trouve repoussé, mais il reste des problèmes. On est ainsi encore trop limité par les raideurs, le pas de temps ou le nombre de particules simulées, les trois paramètres étant directement liés, si l'on cherche à assurer le temps-réel.

Une autre piste que nous n'avons pas exploré consiste à utiliser une intégration temporelle *semi-implicite*. Les méthodes de calcul de forces explicites permettent en effet d'avoir une bonne approximation du jacobien de la force. Ce jacobien pourrait être utilisé pour mieux prévoir la position suivante de chaque particule et pouvoir ainsi augmenter le pas de temps d'intégration sans risque de divergence ¹.

Découpes de l'objet

Une importante partie du développement d'un simulateur chirurgical, non traitée lors de cette thèse, consiste à autoriser l'objet à subir des coupes. Le choix d'un modèle physique explicite permet d'envisager raisonnablement cette extension. Il suffit en effet de supprimer le coefficient gérant l'interaction entre deux particules pour simuler leur séparation. Cotin a dans sa thèse proposé une approche similaire, basée sur la suppression de certains des tétraèdres du maillage [Cot97].

La présence de coupes couplées à une simulation multirésolution est par contre un problème plus complexe. S'il est facile de supprimer des interactions entre les particules du maillage le plus fin, il reste à définir comment doivent interagir les particules des maillages plus grossiers, qui se voient ainsi partiellement séparées. Nous avons pensé simuler ce genre de phénomène en réduisant progressivement les coefficients d'interaction entre particules mères en fonction du nombre de particules filles séparées.

Se pose un nouveau problème lorsque l'on cherche à modifier la *topologie* de l'objet, en le séparant en plusieurs morceaux après découpe. Les différents morceaux peuvent en effet alors subir des rotations importantes et nous avons vu que le modèle de Cauchy s'y prête mal. L'introduction de *repères locaux*, par rapport auxquels est définie la position de l'objet peut être envisagée pour remédier à ce problème.

Ces repères sont capables d'absorber la partie rigide des déformations, ce qui limiterait l'amplitude des déformations gérées par le modèle physique et le rendrait donc plus stable. Ils pourraient être rattachés aux particules du niveau le plus grossier, qui donnent une indication de la position globale de l'objet.

Au delà de la mise au point d'un modèle physique, l'évolution de la *surface* de l'objet lors des coupes est un problème complexe. Faire apparaître des triangles au bon endroit en modifiant localement la géométrie est envisageable. Prendre en compte une petite découpe supplémentaire proche, sans ajouter à chaque fois de nouveaux triangles trop petits est plus difficile.

Ce problème est rendu encore plus complexe par la gestion des *textures* de la surface. Faire en sorte que les nouveaux triangles apparaissent avec une texture uniforme, sans remettre en cause celle des autres triangles est un problème ouvert.

Étude de la multirésolution dynamique

Cette thèse a également soulevé des problèmes directement liés à la multirésolution. Nous avons en effet pu détailler une dizaine de modèles physiques et comparer leur indépendance à la discrétisation de l'objet. Il en

¹ Voir Annexe B.

ressort que de très subtiles nuances (comme celle existant entre les éléments finis et la méthode à base de Voronoï) peuvent changer radicalement le comportement. S'il est facile d'obtenir des comportements grossièrement similaires à différentes résolutions, faire réellement correspondre les animations est très difficile.

La multirésolution *dynamique* est donc un phénomène subtil, qui ne se laisse pour l'instant approcher que par des méthodes au comportement simple. Utiliser davantage les connaissances des physiciens dans ce domaine devrait permettre d'étendre ce type de simulation à des comportements plus complexes.

On se heurte toutefois ici à un problème difficile, car dynamique. La très grande majorité des simulations cherchent à calculer l'état d'équilibre *statique* d'un système. On peut éventuellement atteindre cet état après plusieurs étapes de simulation, mais la simulation reste quasi-statique. La simulation dynamique est beaucoup moins étudiée, car souvent beaucoup trop gourmande en temps de calcul et l'on manque donc d'expérience en ce domaine.

La recherche d'une simulation temps-réel nous conduit également à grandement limiter le nombre de points d'échantillonnage utilisés. Dans ces conditions, la qualité théorique des méthodes peut être prise en défaut, celles-ci s'appuyant parfois sur un phénomène d'échelle pour modéliser le comportement.

On a donc à trouver un compromis difficile entre deux buts antagonistes. On cherche d'une part à obtenir des comportements dynamiques très proches les uns des autres à différentes échelles, ce qui suppose une précision des calculs. On est d'autre part prêt à sacrifier un peu au réalisme de l'animation, pourvu que celle-ci soit suffisamment rapide.

On voit donc que multirésolution et rapidité d'exécution sont difficilement compatibles, et qu'il reste beaucoup de travail à faire avant de tirer pleinement parti des méthodes multirésolution dans le cadre de la simulation temps-réel.

Toutes ces pistes non explorées, ces choix non justifiés par des expériences, font que ce simulateur reste un prototype et pose au moins autant de nouvelles questions qu'il ne répond à d'autres.

Pour conclure

Nous aimerions terminer ce document par quelques réflexions d'ordre plus général et faire que cette thèse mérite son titre, au sens étymologique du terme tout du moins. L'animation en synthèse d'image est un domaine hybride entre l'image et la physique, et cette ambivalence peut poser problème.

On est amené, lorsque l'on cherche à imiter le réel, à utiliser des modèles physiques pour générer les mouvements. Une possibilité est de se plonger dans des ouvrages de physique pour en extraire les équations adéquates. Reste alors à habiller les résultats de la simulation, en utilisant tout l'attrait de mouvements fluides et colorés en trois dimensions ou en invoquant au contraire la lourdeur ou la complexité des calculs mis en œuvre pour justifier la piètre qualité graphique des images générées.

Ce type d'approche n'est pas très enrichissante dans la mesure où la recherche en animation de synthèse semble alors se limiter à habiller des résultats connus des physiciens pour les présenter sous leur meilleur jour. Un récent auteur d'une publication à *Siggraph* me confiait ainsi avoir été troublé en réalisant que la première moitié de son article se composait d'une simple recopie d'équations complexes de la physique des fluides, sa contribution se limitant au rendu attractif des résultats numériques [YOH00].

La recherche en animation, si elle veut être autre chose qu'une "bête" mise en application de connaissances pratiques en création d'images numériques, doit chercher à tirer parti de sa spécificité. Ce n'est pas tant de précision que l'on a besoin, mais plus d'un effet visuel, d'un contrôle intuitif ou de rapidité de calcul.

À titre d'anecdote, lors de *Siggraph'99*, deux articles simulant les mouvements des fluides furent présentés. L'un utilisait les équations différentielles les plus pointues et nécessitait des heures de calcul [Wit99] alors que

l'autre faisait simplement en sorte de reproduire un comportement fluide, l'animation se déroulant en temps-réel [Sta99]. L'assistance a catégoriquement privilégié la seconde approche, les démonstrations ludiques et interactives emportant largement l'adhésion.

Il faut finalement plus chercher à *imiter* la nature pour laisser place à la nouveauté, à la simplification et pourquoi pas au caractère artistique. Il est certes difficile de copier ainsi l'essence du mouvement, mais c'est là que réside la partie recherche de notre domaine.

