



# DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **19 janvier 2018**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **GOLEC Karolina**

Titre de la thèse : « Système Masse-Ressort 3D hybride amélioré pour la simulation de tissus mous »

## Résumé



La nécessité de simulations de tissus mous, tels que les organes internes, se pose avec le progrès des domaines scientifiques et médicaux. Le but de ma thèse est de développer un nouveau modèle générique, topologique et physique, pour simuler les organes humains. Un tel modèle doit être facile à utiliser, doit pouvoir effectuer des simulations en temps réel avec un niveau de précision permettant l'utilisation à des fins médicales.

Cette thèse explore de nouvelles méthodes de simulation et propose des améliorations pour la modélisation de corps déformables. Les méthodes proposées visent à pouvoir effectuer des simulations rapides, robustes et fournissant des résultats physiquement précis. L'intérêt principal de nos solutions réside dans la simulation de tissus mous élastiques à petites et grandes déformations à des fins médicales. Nous montrons que pour les méthodes existantes, la précision pour simuler librement des corps déformables ne va pas de pair avec la performance en temps de calcul. De plus, pour atteindre l'objectif de simulation rapide, de nombreuses approches déplacent certains calculs dans une étape de pré-traitement, ce qui entraîne l'impossibilité d'effectuer des opérations de modification topologiques au cours de la simulation comme la découpe ou le raffinement.

Dans cette thèse, le cadre utilisé pour les simulations s'appelle TopoSim. Il est conçu pour simuler des matériaux à l'aide de systèmes masses-ressorts (MSS) avec des paramètres d'entrée spécifiques. En utilisant un MSS, qui est connu pour sa simplicité et sa capacité à effectuer des simulations temps réel, nous présentons plusieurs améliorations basées physiques pour contrôler les fonctionnalités globales du MSS qui jouent un rôle clé dans la simulation de tissus réels.

La première partie de ce travail de thèse vise à reproduire une expérience réelle de simulation physique qui a étudié le comportement du tissu porcine à l'aide d'un rhéomètre rotatif. Son objectif était de modéliser un corps viscoélastique non linéaire. À partir de l'ensemble des données acquises, les auteurs de l'expérience ont dérivé une loi de comportement visco-élastique qui a ensuite été utilisée afin de la comparer avec nos résultats de simulation. Nous définissons une formulation des forces viscoélastiques non linéaires inspirée de la loi de comportement physique. La force elle-même introduit une non-linéarité dans le système car elle dépend fortement de l'amplitude de l'allongement du ressort et de trois paramètres spécifiques à chaque type de tissu.

La seconde partie de la thèse présente notre travail sur les forces de correction de volume permettant de modéliser correctement les changements volumétriques dans un MSS. Ces forces assurent un comportement isotrope des solides élastiques et un comportement correct du volume quel que soit la valeur du coefficient de Poisson utilisé. La méthode nécessite de résoudre deux problèmes: l'instabilité provoquant des plis et les contraintes de Cauchy. Nos solutions à ces limitations impliquent deux étapes. La première consiste à utiliser trois types de ressorts dans un maillage entièrement hexaédrique: les arêtes,

les faces diagonales et les diagonales internes. Les raideurs des ressorts dans le système ont été formulées pour obéir aux lois mécaniques de base. La deuxième étape consiste à ajouter des forces de correction linéaires calculées en fonction du changement de volume et des paramètres mécaniques du tissu simulé, à savoir le coefficient de Poisson et le module de Young.

La troisième partie concerne les aspects de création d'un maillage précis et léger. C'est en effet un des éléments les plus importants lorsqu'il s'agit de simulations de corps réels. Dans ce chapitre, nous présentons une introduction à la mise en œuvre de maillages d'éléments mixtes construits avec les éléments 3D suivants: tétraèdres, prismes, pyramides et hexaèdres. Le maillage mixte nous permet d'obtenir un niveau de détail plus précis tout en diminuant le nombre d'éléments à utiliser. Une telle structure nécessite une formulation correcte des raideurs des ressorts pour chaque élément, pour produire une méthode physiquement réaliste. Notre cadre générique peut être étendu au maillages mixtes en se basant sur les mêmes lois que la structure entièrement hexaédrique. Le modèle mixte devra ensuite être comparé aux maillages validés existants ainsi qu'aux solutions FEM.

Les systèmes masses-ressorts sont connus pour être simples et faciles à utiliser, mais ils nécessitent une base physique solide pour être utilisés dans le cadre de simulations physiques précises. D'un autre côté, l'environnement médical cherche constamment à pousser les méthodes dans le sens de la simulation en temps réel d'objets déformables détaillés. Les méthodes présentées dans ce travail nous permettent de contrôler globalement la non-linéarité et le volume d'un système masses-ressorts, et améliorent également sa précision. De plus, la mise en œuvre de maillage mixtes facilitera des simulations précises avec des performances en temps réel en diminuant le nombre d'éléments requis.