

4 Résumé de la thèse

Du fait de l'importance accrue des personnages virtuels dans tous les secteurs du loisir numérique, la simulation de chevelures est devenue, ces dernières années, un thème de recherche très actif en informatique graphique. Par ailleurs, la simulation physique de cheveux attire de plus en plus l'attention des cosmétologues, qui voient dans le prototypage virtuel un moyen efficace pour mettre au point des produits capillaires.

Cette thèse s'attaque à deux grandes difficultés antagonistes liées à la simulation de chevelures : d'une part, la simulation en temps interactif d'une chevelure complète ; d'autre part, le réalisme physique de la forme et du mouvement d'une chevelure.

Simulation interactive de chevelures

Si dans les années 2000 - 2001, les cheveux courts et la fourrure avaient déjà pu être représentés et animés avec succès dans plusieurs films d'animation, tels que *Stuart Little* ou *Monstres et Cie*, l'animation de longues chevelures libres continuait à poser en revanche d'importants problèmes, essentiellement liés aux interactions complexes se produisant entre la chevelure et le corps du personnage, et au sein-même de la chevelure. La première contribution de cette thèse a ainsi consisté à élaborer de nouveaux algorithmes visant à réduire le coût de calcul inhérent aux méthodes classiques d'animation de chevelures.

Nous introduisons tout d'abord une méthode d'animation adaptative de chevelures, dont le principe est l'adaptation automatique du nombre de degrés de liberté de la chevelure en fonction du mouvement. Cette méthode permet de réduire notablement le coût de simulation d'une chevelure complète, en concentrant les calculs là où ils sont nécessaires.

Le principe repose sur une nouvelle structure de contrôle de la chevelure, appelée *Arbre adaptatif de mèches (AAM)*, qui permet de simuler à la fois le mouvement global de la chevelure, et les variations à petites échelles des mèches individuelles. L'avantage de l'AAM par rapport aux méthodes précédentes est la réduction notable du coût de simulation et de traitement des interactions, grâce à l'identification automatique des zones de la chevelure où les mouvements visibles de cheveux sont susceptibles de se produire. L'AAM est couplé à une géométrie multirésolution de la chevelure, initialement employée pour définir le modèle de coiffure que l'on souhaite animer. Ce système couplé produit des animations stables, mettant en évidence les effets naturels de regroupements ou de séparations en mèches de la chevelure au cours du mouvement. Nos résultats montrent en outre que la méthode peut s'appliquer à différents types de cheveux, aussi bien lisses que bouclés.

Une deuxième étude, concentrée cette fois-ci sur le rendu d'une chevelure en mouvement, nous amène à considérer la chevelure comme un milieu volumique, représenté à l'aide d'une carte de densité 3D orientée selon la direction de la lumière. Cette structure originale combine une représentation volumique de la chevelure avec une partition de l'espace orientée selon la lumière supposée unidirectionnelle. Grâce à cette carte 3D (appelée dans la suite *carte d'ombre* ou tout simplement *grille*), l'auto-ombrage de cheveux peut être calculé de manière précise en des temps interactifs (quelques images par seconde pour une coiffure complète) sur un CPU standard.

La méthode est particulièrement adaptée au rendu de chevelures animées, car aucun précalcul sur la géométrie de la chevelure n'est requis ; de plus les structures de données en jeu sont rapidement remises à jour à chaque pas de temps. En outre, elle offre une méthode alternative, très efficace, pour gérer de manière volumique les interactions mécaniques entre cheveux à chaque pas de temps.

Cette recherche nous a finalement permis de montrer, pour la première fois, qu'il était possible d'envisager des scènes *interactives* comportant des animations de cheveux de bonne qualité. Les travaux que nous avons développés pour la simulation interactive de chevelures ont notamment commencé à être intégrés dès fin 2004 au sein de la plate-forme GrImage de réalité virtuelle de l'INRIA Rhône-Alpes. L'intégration d'un tel simulateur de cheveux dans la plate-forme GrImage devrait ainsi permettre d'accroître le réalisme et d'enrichir la diversité des personnages virtuels déjà animés dans cette plate-forme.

Simulation réaliste de chevelures

Dans un deuxième temps, nous nous sommes attaqués au problème de la modélisation *physiquement réaliste* d'une chevelure. En effet, toutes les méthodes de simulation de chevelures présentées au sein de la communauté d'informatique graphique jusqu'à présent s'étaient finalement limitées à l'utilisation de modèles physiques assez approximatifs pour la chevelure. En particulier, aucune des méthodes précédentes n'était capable de prendre en compte, de manière réaliste, certains comportements typiques des cheveux réels tels que la formation de boucles, la dynamique de cheveux bouclés, le rôle de l'encastrement et de la section elliptique du cheveu dans la détermination de la forme de la chevelure, l'effet de l'eau sur les cheveux, etc. La seconde contribution de cette thèse a ainsi porté sur la conception d'un modèle physiquement réaliste de chevelure, en collaboration avec Basile Audoly, chercheur en modélisation mécanique, et avec la société L'Oréal, spécialiste dans le domaine de la cosmétologie.

Notre modélisation s'appuie sur le modèle de tige de Kirchhoff pour les tiges élastiques inextensibles et non soumises au cisaillement, bien connu en mécanique. Le modèle proposé se base sur la discrétisation spatiale d'une tige de Kirchhoff en un ensemble fini de morceaux de courbures et torsion constante. Chacun de ces morceaux, paramétré par trois degrés de liberté (deux en courbure et un en torsion) a la propriété de présenter une courbe moyenne parfaitement hélicoïdale, d'où le nom de *Super-Hélice* choisi pour cette représentation de la tige comme un ensemble fini d'hélices raccordées de manière C1.

Nous montrons ensuite que ce modèle de tige est bien adapté à la génération de chevelures naturelles statiques, en calculant l'équilibre de quelques centaines de cheveux guide en collision avec la tête du personnage et avec eux-mêmes, grâce à une minimisation d'énergie potentielle. La génération de l'ensemble de la chevelure est réalisée grâce à un modèle procédural de mèche, construit statistiquement autour de chaque cheveu guide. Notre logiciel final est capable de prédire la forme d'une chevelure naturelle, pour des types ethniques variés, et à partir d'un nombre réduit de paramètres intuitifs (longueur, rayon, masse volumique, module d'élasticité, etc.). Grâce au modèle physique sous-jacent, il est également possible de réaliser virtuellement des opérations de coiffure classiques telles que le mouillage, la coupe et le séchage.

Enfin, nous élaborons un nouveau modèle de tige dynamique et l'appliquons à des chevelures complètes en mouvement. Nous mettons tout d'abord en évidence le fait que les méthodes classiques de discrétisation spatiale par différences finies ne sont pas adaptées à la simulation stable de la dynamique d'une tige, car l'approximation spatiale alors induite conduit à une divergence systématique du modèle dès lors que la courbure interne devient trop importante, et ce quelle que soit la résolution choisie pour la discrétisation. Nous montrons alors que la représentation de la tige comme une Super-Hélice répond de manière pertinente au problème, car ce modèle, déjà discret en espace, ne nécessite aucune approximation supplémentaire pour son intégration numérique. La dynamique de la tige est alors simulée à l'aide des équations de Lagrange, chacun des termes dérivés en espace pouvant se calculer de manière formelle. Nous étendons ensuite ce modèle de tige dynamique à l'animation d'une chevelure complète, en calculant d'une part les interactions se produisant entre cheveux guide grâce à un algorithme efficace de suivi de paires de point les plus proches, d'autre part en concevant un nouvel habillage géométrique de la chevelure, basé sur une semi-interpolation entre cheveux guide voisins, qui permet de jeter un pont entre l'aspect continu des chevelures lisses et l'aspect en mèches bien séparées caractéristique de certaines chevelures bouclées.

Finalement, le modèle final de cheveu couplé aux interactions est validé grâce à une série d'expériences sur la mèche, et par des comparaisons avec des mèches réelles dont on a au préalable mesuré les paramètres physiques de fibre, et que l'ont injectés en entrée du modèle. Allant plus loin que les méthodes précédentes dans le réalisme physique, notre modèle est capable de capturer précisément le comportement non-linéaire des cheveux en mouvement, ainsi que la dynamique de cheveux bouclés. Comme l'illustrent nos résultats, notre méthode permet de reproduire les effets subtils se produisant au sein d'une chevelure animée.

Grâce au partenariat fortement pluridisciplinaire mis en jeu lors de ce projet ambitieux, il est ainsi apparu qu'il était possible d'aller beaucoup plus loin dans la modélisation mécanique réaliste des cheveux que tout ce qui avait déjà été fait en informatique graphique auparavant. Le simulateur a été transféré vers les laboratoires de L'Oréal, qui souhaitent à terme l'étendre et l'utiliser dans le cadre d'applications cosmétologiques, en complément de leurs expériences menées sur des mèches et chevelures réelles.