

INTRODUCTION

Le projet s'inscrit dans le cadre des activités de recherche de la Chaire industrielle CRSNG/Medtronic en biomécanique de la colonne vertébrale (Pr Aubin) et aussi dans celles du Pôle d'excellence en musculo-squelettique du Centre de Recherche du CHU Sainte-Justine. Il a pour contexte des problèmes concrets et pertinents associés à l'instrumentation chirurgicale de déformations complexes de la colonne vertébrale (scolioses idiopathiques, congénitales ou neuromusculaires, cyphoses). Les précédentes études menées dans notre laboratoire sur la planification de telles chirurgies ont démontré la grande variabilité des objectifs de correction [1] et des stratégies d'instrumentation [2, 3], même pour des chirurgiens chevronnés.

Dans ce contexte, notre laboratoire développe depuis quelques années des outils numériques permettant de simuler sur ordinateur différentes stratégies d'instrumentation avant leur mise en œuvre sur patient [4,5]. Avec ces outils, il a été démontré que la variabilité des stratégies (inter- et intra-chirurgical) avait un impact significatif sur la correction résultante et les efforts exercés par les implants sur les vertèbres [5, 6]. Ce simulateur de chirurgies (nommé S3) a aussi été relié à une technique d'optimisation permettant de planifier la stratégie opératoire la plus efficace en fonction d'objectifs que le chirurgien doit pré-déterminer [5]. Cependant, bien qu'ayant montré la pertinence clinique du simulateur S3, les chirurgiens ne disposent pas encore d'outils leur permettant de reproduire parfaitement la stratégie optimale sur le patient. En effet, la complexité et l'approche manuelle de l'intervention rendent difficile l'insertion des implants conformément à la planification exprimée en termes de points d'entrée et de trajectoires. De plus, de nombreux ajustements sont souvent requis lors de l'intervention, faisant ainsi dévier la mise en œuvre de la stratégie optimale.

En 2009, le Pr Aubin a obtenu une subvention d'infrastructure majeure de la Fondation Canadienne pour l'Innovation / Gouvernement du Québec (FCI/Qc) de 7.4 M\$ permettant la mise sur pied de la 1^{ère} salle d'opération intégrée (iOR) au Canada ainsi que l'acquisition de plusieurs technologies d'imagerie fluoroscopique 2D/3D (O-arm) et de navigation intra-opératoire (StealthStation S7, Medtronic/Navigation) pour la chirurgie assistée par ordinateur. En avril 2010, les équipements ont été achetés et livrés au CHU Sainte-Justine. Nous avons négocié avec Medtronic (le même partenaire que notre chaire CRSNG) un partenariat de développement nous permettant d'avoir accès au code source de leurs logiciels. Ces systèmes d'assistance chirurgicale sont extrêmement utiles pour planifier l'instrumentation du rachis et guider le chirurgien lors de l'intervention. Cependant, contrairement à notre simulateur de chirurgie, ils ne permettent pas encore de « prédire » le résultat de l'intervention ni d'en déterminer la stratégie opératoire optimale.

Le projet proposé consiste donc à mettre sur pied la nouvelle génération des techniques d'assistance chirurgicale, en développant un système qui intègre à la fois les fonctionnalités du navigateur StealthStation et celles de notre simulateur de chirurgie. Ce nouvel outil permettra (1) de calculer en pré-opératoire la stratégie chirurgicale optimale en prédisant les résultats de l'intervention, et (2) de guider le chirurgien en per-opératoire tout en lui permettant d'ajuster en temps réel la stratégie optimale précédemment calculée.

MÉTHODES

Ce projet d'envergure comporte des développements en informatique mais aussi en modélisation biomécanique afin de repenser et adapter les outils d'assistance pré- et per-opératoire aux besoins cliniques des chirurgiens. La méthodologie envisagée comporte les étapes suivantes :

1. Simuler la stratégie chirurgicale optimale au cours d'une phase pré-opératoire (avec S3), et assurer le transfert de la planification au système de navigation StealthStation.
2. Compléter et améliorer le modèle par multi-corps flexibles de la colonne vertébrale et du bassin inclus dans S3 [4] pour la phase per-opératoire.
 - a. Modéliser la posture per-opératoire (différente de celle acquise pour la planification) par recalage à partir des informations provenant du fluoroscope (O-arm) et/ou du navigateur StealthStation, et mettre à jour les nouvelles positions et orientations des implants.
 - b. Modéliser l'instrumentation chirurgicale, et ajuster (en temps réel) les manœuvres de correction aux mouvements du patient mesurés à l'aide du StealthStation.

- c. Développer des fonctions permettant d'interroger dynamiquement le modèle numérique pour optimiser les manœuvres de correction durant l'intervention.
3. Valider les composantes du système complet lors de chirurgies de la colonne vertébrale réalisées au CHU Sainte-Justine avec l'équipement FCI/Qc.

RÉSULTATS

Un banc d'essai basé sur un modèle synthétique de colonne vertébrale en mousse de polyuréthane (un sawbone) permet de simuler et de reproduire les postures pré-opératoire (en position debout) et per-opératoire (en position couchée en décubitus ventral) d'un cas clinique réel de scoliose. L'objectif à court terme étant de montrer la faisabilité de combiner les fonctionnalités du navigateur StealthStation et du simulateur S3, le problème a évidemment été simplifié tout en conservant sa pertinence clinique : le modèle synthétique de scoliose représente un cas réel de courbure thoracique droite et le banc d'essai permet alors de simuler des conditions aux frontières réalistes (les degrés de liberté du bassin et de la tête). Également, dans cette étude de faisabilité, nous considérons uniquement les premières manœuvres chirurgicales, à savoir l'insertion des implants, l'attachement de la tige sur les implants, et des rotations simples de la tige.

Étape 1 : Planification pré-opératoire

La planification pré-opératoire de l'intervention se fait en utilisant une reconstruction en trois dimensions du modèle synthétique de la colonne vertébrale (obtenue à partir de 2 radiographies en deux dimensions de face et de profil du banc d'essai), ainsi que des simulations biomécaniques des différentes manœuvres de l'intervention chirurgicale : discectomies, insertion des implants, cintrage des tiges, attachements des tiges, rotation des tiges, dérotation vertébrale directe, compression ou distraction de vertèbres...

Le résultat de la planification consiste en l'ensemble de données suivant : les niveaux vertébraux instrumentés, les type, nombre, longueur et diamètre des implants, les position et orientation des implants relativement aux vertèbres, les matériau, longueur et diamètre des tiges, les formes cintrées des tiges, et l'analyse des efforts générés aux interfaces implant-vertèbre et vertèbre-vertèbre.

Étape 2a : Modélisation de la posture per-opératoire par recalage

Une nouvelle approche de recalage est présentement développée dans notre laboratoire pour recalcr les images médicales obtenues par fluoroscopie 3D avec la modélisation géométrique de la colonne vertébrale (synthétique) obtenue en pré-opératoire. Ce recalage permet la mesure automatique de la colonne ainsi que de mettre à jour le modèle numérique de simulation (généralisé en pré-opératoire) avec les nouvelles données collectées durant les manœuvres chirurgicales.

CONCLUSION

Ce projet comporte plusieurs défis majeurs et permettra le développement d'outils pertinents et novateurs pour une avancée jugée importante dans la mise sur pied et la validation d'un système d'assistance chirurgicale de prochaine génération.

Les contributions scientifiques et technologiques de ce projet concerneront le développement de:

- Nouveaux modèles biomécaniques de la colonne vertébrale (modèles éléments finis, modèles multi-corps flexibles, ...) qui satisferont des fonctionnalités propres aux chirurgies de la colonne avec un système de navigation (localisation et Guidage en temps réel et en trois dimensions).
- Nouveaux modèles des instrumentations naviguées qui satisferont des fonctionnalités propres à la simulation de chirurgies en pré-opératoire (Planification en trois dimensions et optimisation des manœuvres chirurgicales par la prédiction des résultats de correction)
- Nouvelles méthodes de recalage entre la posture per-opératoire du patient et la posture pré-opératoire (utilise pour la planification pré-opératoire) en utilisant des techniques de reconstruction innovantes en trois dimensions, pour permettre un ajustement des manœuvres chirurgicales en temps réel.

- Nouveaux outils d'assistance qui combinent les fonctionnalités d'un système de navigation avec celles d'un simulateur de chirurgie pour le traitement chirurgical des déformations de la colonne vertébrale.

Finalement, un plan de transfert des connaissances est prévu, tout en s'assurant que la propriété intellectuelle demeure au CHU Ste-Justine et à l'École Polytechnique. Les outils de simulation et de navigation pourront être utilisés par les chirurgiens ultérieurement pour l'assistance lors de chirurgies d'instrumentation. Les résultats et l'expertise développés par ce projet pourront également avoir des retombées pour d'autres traitements orthopédiques de la colonne vertébrale.

RÉFÉRENCES

- [1] Y Majdouline, C-E Aubin, M Robitaille, J F Sarwark, and H Labelle. Scoliosis correction objectives in adolescent idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop*, 27(7):775–781, November 2007.
- [2] M Robitaille, C-E Aubin, and H Labelle. Intra and interobserver variability of preoperative planning for surgical instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J*, 16(10):1604–1614, October 2007.
- [3] C-E Aubin, H Labelle, and OC Ciolofan. Variability of spinal instrumentation configurations in adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J*, 16(1):57–64, 2007.
- [4] C-E Aubin, H Labelle, C Chevretils, G Desroches, J Clin, and A Boivin. Preoperative planning simulator for spinal deformity surgeries. *Spine*, 33(20):2143–2152, September 2008.
- [5] Y Majdouline, C-E Aubin, A Sangole, and H Labelle. Computer simulation for the optimization of instrumentation strategies in adolescent idiopathic scoliosis. *Med Biol Eng Comput*, 47(11):1143–1154, November 2009.
- [6] M Robitaille, C-E Aubin, and H Labelle. Effects of alternative instrumentation strategies in adolescent idiopathic scoliosis: a biomechanical analysis. *J Orthop Research*, 27(1):104–113, 2009.