

Planification chirurgicale de la scoliose idiopathique adolescente à l'aide d'un jumeau numérique combinant modèle biomécanique et analyse prédictive afin de permettre une évaluation des risques de complications biomécaniques post-opératoires.

Lola Meynard-Duffour* ¹, Pierre-Jean Arnoux ², Brice Ilharreborde ³, Carl-Éric Aubin ⁴

¹ Polytechnique Montréal ; Azrieli Research Center - CHU Sainte-Justine, Montreal ; LBA, Aix Marseille Univ, Univ Gustave Eiffel ; iLab-Spine – Laboratoire International en Imagerie et Biomécanique du Rachis, Génie mécanique, Marseille, France

² LBA, Aix Marseille Univ, Univ Gustave Eiffel ; iLab-Spine – Laboratoire International en Imagerie et Biomécanique du Rachis, LBA, Marseille, France

³ Robert Debré Hospital, AP-HP, Paris Cité University, Department of Pediatric Orthopaedic, Paris, France

⁴ Polytechnique Montréal ; Azrieli Research Center, CHU Sainte-Justine ; iLab-Spine – Laboratoire International en Imagerie et Biomécanique du Rachis, Génie mécanique, Montréal, Canada

INTRODUCTION :

Bien que des outils prédictifs basés sur l'intelligence artificielle (IA) aient été développés pour faciliter la planification chirurgicale de la fusion vertébrale postérieure, la plupart se concentrent principalement sur la correction radiographique et négligent des déterminants biomécaniques essentiels de la stabilité postopératoire. Cette limitation réduit leur capacité à anticiper certaines complications mécaniques. Cette étude présente une approche hybride de jumeau numérique associant une planification prédictive basée sur l'IA à un modèle biomécanique fondé sur la physique, afin d'évaluer alignement, mobilité et mécanique postopératoire de la colonne.

MATÉRIEL ET MÉTHODE :

Cette approche a été évaluée rétrospectivement chez 15 patients atteints de scoliose idiopathique adolescente présentant une courbure thoracique principale ($55^{\circ} \pm 10^{\circ}$). La planification réalisée à l'aide du logiciel d'analyse prédictive UNID, Medtronic a été intégrée à un modèle 3D biomécanique multi-corps de la colonne vertébrale, et spécifique au patient. Ce modèle intègre les propriétés mécaniques individualisées, l'effet de la gravité, les caractéristiques de l'instrumentation ainsi que les manœuvres chirurgicales (Fig). La fiabilité du

modèle a été établie conformément à la norme ASMEV&V40 recommandée par la FDA, à travers des processus de vérification, validation et quantification des incertitudes. Une étude de sensibilité a été menée en variant de manière systématique la longueur de l'instrumentation et le cintrage des tiges. Enfin, l'applicabilité clinique de l'approche a été illustrée à travers deux cas cliniques.

RÉSULTATS :

L'alignement postopératoire simulé présentait un écart inférieur à 5° par rapport aux mesures radiographiques pour l'ensemble des paramètres coronaires et sagittaux, sans différence significative ($p \leq 0,01$, puissance $> 80\%$). Les forces et moments simulés au niveau de la colonne vertébrale demeuraient dans les limites physiologiques. Les résultats de la vérification et de la quantification des incertitudes se sont révélés cohérents avec le contexte d'utilisation et le niveau de risque associé. Les variations de l'instrumentation ont exercé une influence sur les forces et moments appliqués à la colonne (jusqu'à 71%). Les études de cas ont montré que des stratégies alternatives pouvaient maintenir une correction similaire (différence $< 3^{\circ}$) tout en réduisant le moment distal (jusqu'à 96%) ou en préservant des segments mobiles supplémentaires sans augmenter le risque biomécanique.

CONCLUSION :

Ce jumeau numérique hybride, fondé sur la physique et alimenté par IA, offre un cadre cliniquement fiable pour la planification chirurgicale des déformations de la colonne vertébrale. En quantifiant les charges et moments liés à l'instrumentation, en complément de la correction radiographique, cette approche favorise une prise de décision fondée sur l'évaluation des risques biomécaniques et met en évidence le potentiel des technologies numériques émergentes dans la prise en charge des déformations rachidiennes.

