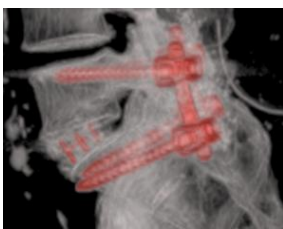


Recalage pré-opération / per-opération par intelligence artificielle dans la chirurgie du rachis

Structure d'accueil : L'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) est une unité de recherche mixte dont les tutelles principales sont Sorbonne Université, le CNRS et l'Inserm. L'ISIR est situé dans les locaux de Sorbonne Université (campus Pierre et Marie Curie, Paris 5e) au centre de Paris. Les chercheuses et chercheurs de l'ISIR s'intéressent aux systèmes intelligents (conception, modélisation et commande) couvrant un large spectre d'applications allant de l'industrie à la santé. Les disciplines de recherche sous-jacentes sont nombreuses, incluant la mécanique, la mécatronique, les théories du contrôle, la perception (vision, perception haptique, etc.), ainsi que les différentes facettes de l'apprentissage automatique.

L'ISIR est organisé en 5 équipes de recherche dont l'équipe RPI-Bio (Robotique, perception et interaction pour le biomédical) que rejoindra la ou le candidat sélectionné

Contexte : Le nombre d'interventions en chirurgie du rachis augmente régulièrement, tant pour les traumatismes que pour les pathologies dégénératives. À titre d'exemple, environ 200 000 fusions lombaires ont été réalisées aux États-Unis en 2015, soit 62 % de plus qu'en 2004, pour un coût de plusieurs dizaines de milliers de dollars par opération.



L'arthrodèse lombaire (voir Fig. ci-contre) consiste à fusionner plusieurs vertèbres entre elles afin de limiter les déplacements responsables de douleurs. Cet acte chirurgical consiste à insérer des vis dans les pédicules vertébraux afin de stabiliser la colonne vertébrale. Ces vis sont connectées par des tiges assurant une fixation rigide, favorisant la fusion vertébrale et améliorant les résultats fonctionnels. La pose de ces vis s'avère complexe et difficile, en particulier chez certains patients, alors que la précision est un gage majeur de réussite de l'opération.

Une étude réalisée en 2018¹ a révélé que jusqu'à 10 % des vis pédiculaires placées à main levée sont mal positionnées, ce qui amène un patient sur 300 à subir une révision. Ceci a conduit à une augmentation notable de l'assistance guidée par l'image pour les arthrodèses : 10,76 % de toutes les arthrodèses réalisées à l'aide de la navigation en 2017, contre seulement 0,38 % en 2010². En parallèle de ces solutions de navigation 3D qui requièrent le positionnement de marqueurs, des solutions robotiques ou de réalité augmentée/mixte sont apparues. Chacune apporte ses avantages et ses inconvénients. Par exemple, les systèmes de navigation rendent le placement de vis pédiculaires plus accessible aux chirurgiens juniors et réduisent certains risques. La robotique, ou encore la réalité augmentée/mixte, apporte une valeur ajoutée clinique, notamment lors de l'insertion des vis dans les pédicules, où la planification des trajectoires d'insertion est bien établie³. Tous ces systèmes aident le chirurgien à mieux placer les vis au niveau des pédicules, selon les plans sagittaux et coronaires planifiés sur les CT préopératoires. Que ce soit pour les systèmes de guidage par l'image, la robotique ou la réalité augmentée, un verrou scientifique majeur réside dans le recalage précis et continu du CT-scan préopératoire par rapport au squelette du patient.

Dans la pratique clinique actuelle, les CT-scan sont très majoritairement utilisés, malgré l'exposition des patients aux rayonnements inhérente à ce type d'acquisition. En effet, une étude sur le traitement de la sténose lombaire a révélé un taux de précision de 95,5 % pour les techniques utilisant le CT-scan contre

¹ Floccari, L. et al. Minimize Implants Maximize Outcomes Study Group. Which Malpositioned Pedicle Screws Should Be Revised? J. Pediatr. Orthop. 2018.

² Sharma, Met al. Trends and Long-Term Health Care Utilization of Computer-Assisted Neuronavigation in Spine Fusions: An Exact Matched Analysis of National Administrative Database. World Neurosurg. 2022.

³ Azad, T. D, et al. Augmented reality in spine surgery—past, present, and future. The Spine Journal, 2024.

91,5 % pour celles utilisant la fluoroscopie⁴. Comme il n'est pas envisageable de réaliser des CT-scans fréquents durant l'opération en raison de leur effet irradiant, une autre modalité doit être utilisée pour le recalage continu.

Adéquation à l'Institut universitaire pour l'Ingénierie en Santé : Ce projet doctoral est hautement multidisciplinaire, à l'intersection de la médecine et de l'intelligence artificielle. Les chercheurs en IA seront nourris des apports des chirurgiens pour définir ensemble un protocole opératoire qui répond, d'une part, aux besoins et aux normes hospitalières, et, d'autre part, soit réaliste. Il est pour cela déjà prévu que les chercheurs en IA participent à des opérations de la colonne vertébrale à l'hôpital Trousseau.

Objectifs scientifiques : Dans un premier temps, un protocole opératoire doit être élaboré avec l'aide des praticiens hospitaliers. Il pourrait consister, par exemple, en un CT-scan préopératoire sur lequel sont définies les trajectoires des vis pédiculaires, ainsi qu'en un CT-scan peropératoire réalisé juste en amont de l'opération, pour un recalage initial des vertèbres. Ces deux CT-scans sont en effet déjà réalisés et un dataset de plusieurs centaines, voire de quelques milliers, de scans est déjà disponible à l'hôpital Trousseau. Une seconde modalité d'acquisition non irradiante, à définir, permettra le suivi continu de la pose des vertèbres à partir du premier recalage. Les recalages CT-scan/CT-scan et CT-scan/nouvelle modalité devront ensuite être réalisés avec une difficulté majeure, car la colonne vertébrale n'est pas un objet rigide. En particulier, un net déplacement anatomique est constaté entre le CT-scan préopératoire, réalisé avec la personne sur le dos, et le CT-scan peropératoire, réalisé avec la personne sur le ventre. Par ailleurs, le geste chirurgical lui-même induit des déformations en continu de la colonne qui peut être considérée comme un objet rigide par morceaux (les vertèbres). Une autre difficulté tient à la taille des bases de données existantes, qui ne contiennent que très peu de patients et de modalités.

Plusieurs pistes de travail sont envisagées pour répondre à cette problématique. Afin de pallier le problème des bases de données, une première piste consiste à synthétiser de nouveaux CT-scans à partir de CT-scans existants, en les déplaçant selon un mouvement physiquement réaliste. Ces travaux seront menés en étudiant les propriétés biomécaniques de la colonne vertébrale saine ou pathologique. Des rendus 2D texturés pourront également être générés pour entraîner des algorithmes de recalage basés sur le deep learning, la vérité de terrain étant connue par construction. Ces approches de création de nouvelles données devront intégrer des contraintes biomécaniques dans des modèles génératifs basés sur l'IA .

Concernant le recalage, plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature. Une grande majorité d'entre elles porte sur le recalage d'objets rigides, avec, parfois, l'utilisation de landmarks dans le cadre de la chirurgie du rachis⁵. Une fois les vertèbres segmentées sur les CT-scans, le recalage entre les colonnes vertébrales préopératoires et postopératoires peut être considéré comme un recalage rigide par morceaux. Des travaux existent où le recalage de chaque vertèbre est réalisé de manière indépendante, sans aucune contrainte relative⁶. Polypose⁷ propose d'estimer les poses des vertèbres puis de les interpoler de manière fluide dans l'espace. De manière similaire, SpineRegNet⁸ recale les vertèbres séparément, puis effectue une fusion élastique pour obtenir un champ de déformation dense. D'autres travaux, particulièrement utilisés pour les robots, s'intéressent à la pose d'objets articulés, en s'appuyant sur la connaissance des articulations et de leur degré de liberté. Nous proposons ici d'associer, dans un même modèle end-to-end, le recalage rigide des vertèbres et un modèle de vraisemblance des déplacements entre elles. Ce modèle pourra également exploiter les avancées récentes des modèles de fondation permettant de reconstituer de l'information 3D à partir de données 2D⁹.

⁴ La Rocca, G et al. G. Intraoperative CT-Guided Navigation versus Fluoroscopy for Percutaneous Pedicle Screw Placement in 192 Patients: A Comparative Analysis. *J. Orthop. Traumatol.* 2022.

⁵ Naik, R et al. A hybrid 3D-2D image registration framework for pedicle screw trajectory registration between intraoperative X-ray image and preoperative CT image. *Journal of Imaging*, 2022.

⁶ Liebmann, F et al. Automatic registration with continuous pose updates for marker-less surgical navigation in spine surgery. *Medical Image Analysis*, 2024.

⁷ Gopalakrishnan V et al. PolyPose: Deformable 2D/3D Registration via Polyrigid Transformations. *ArXiv* 2025 .

⁸ Lei Zhao et al. SpineRegNet: Spine Registration Network for volumetric MR and CT image by the joint estimation of an affine-elastic deformation field, *Medical Image Analysis*, 2023.

⁹ Wang, J et al. Vggt: Visual geometry grounded transformer. In *Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference* 2025.

Equipe encadrante :

- **Catherine Achard** (PU, ISIR, SU), spécialiste en computer vision et IA

Catherine Achard a déjà une expérience dans l'IA appliquée à la médecine, notamment au travers du projet européen MAESTRIA¹⁰ ou de l'analyse de tâches chirurgicales¹¹. Elle a également travaillé sur le recalage de nuages de points¹².

- **Brahim Tamadazte** (DR CNRS, ISIR, SU), spécialiste de la vision par ordinateur, de la robotique médicale et du machine learning en santé. Ces dernières années, il s'intéresse de plus en plus au développement d'une plateforme robotique pour la pose de vis pédiculaires dans le rachis^{13, 14, 15}, en collaboration avec Raphaël Vialle, ainsi qu'à des moyens de perception non-ionisants dans le bloc opératoire, couplés à des méthodes d'IA pour le recalage 3D/3D¹⁶ et 2D/3D.
- **Raphaël Vialle** (PUPH, APHP, Hôpital Trousseau, SU), spécialiste de la chirurgie du rachis (scoliose) chez les enfants, d'une renommée internationale. La collaboration entre l'ISIR et l'Hôpital Armand-Trousseau est bien établie, notamment à travers la participation aux projets EU H2020 FAROS^{17, 18}, FHU SpineMed2, ainsi qu'au projet ANR RODEO. Ces collaborations ont permis de structurer une activité de recherche importante et fructueuse portant sur l'utilisation de la robotique, de la vision par ordinateur et de l'IA pour améliorer les protocoles de chirurgie du rachis.

10 Portal, N., ... & Achard, C. Semi-supervised motion flow and myocardial strain estimation in cardiac videos using distance maps and memory networks. *Computers in Biology and Medicine*, 2025.

11 Segmenting Surgical Tasks using Temporal Convolutional Neural Network, M Millan, C Achard, *Computer Assisted Radiology and Surgery*

12 Slimani, Karim, Achard, Catherine, et Tamadazte, Brahim. RoCNet++: Triangle-based descriptor for accurate and robust point cloud registration. *Pattern Recognition*, 2024.

13 E. Saghbiny, ... & B. Tamadazte, R. Vialle, "Robotic Platform for Pedicle Drilling in Spine Surgery: a Proof of Concept", *Innovation and Research in BioMedical Engineering* (under review).

14 L. Leblanc, ... & R. Vialle, G. Morel, B. Tamadazte, "Automatic Spinal Canal Breach Detection During Pedicle Screw Placement", *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024.

15 E. Saghbiny, ... & R. Vialle, G. Morel, B. Tamadazte, "Breach detection in spine surgery based on cutting torque", *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2024, DOI: 10.1109/TMRB.2024.3421543.

16 K. Slimani, C. Achard, B. Tamadazte, "iMatcher: Improve matching in point cloud registration via local-to-global geometric consistency learning", *Pattern Recognition* (accepted), 2026.

17 L. Leblanc, R. Vialle, ... & B. Tamadazte, "Pedicle Drilling Planning Transfer for Spine Surgery using Functional Map Correspondences", *IEEE/RSJ IROS*, 2024.

18 E. Saghbiny, B. Tamadazte, R. Vialle, "The Impact of Varying Drilling Angles on Cutting Torque with a Robotic System Designed for Breach Detection during Pedicle Screw Placement", *Global Spine Congress*, 2023.