

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). 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.

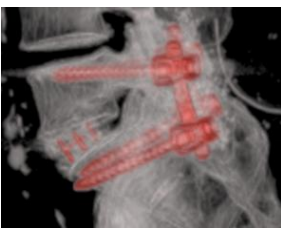
Supervision :

- **Catherine Achard** (PU, ISIR, SU), spécialiste en computer vision et intelligence artificielle.
- **Brahim Tamadazte** (DR CNRS, ISIR, SU), spécialiste de la vision par ordinateur, de la robotique médicale et du machine learning en santé.
- **Raphaël Vialle** (PUPH, APHP, Hôpital Trousseau, SU), spécialiste de la chirurgie du rachis (scoliose) chez les enfants.

Financement : Allocation de Recherche de Sorbonne Université. Le financement est attribué en fonction du profil et du parcours du candidat qui sera amené à présenter son dossier de candidature devant un jury de sélection.

Date : début souhaité entre octobre et décembre 2026. Financement pour 3 ans

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 (Fig. ci-contre) consiste à fusionner plusieurs vertèbres 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

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.

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 coronaux 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 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. 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.

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 recalcule les vertèbres séparément, puis effectue une

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

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.

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 recadrage 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.

Profil et compétences :

Diplôme de Master en informatique ou en mathématiques appliquées, diplôme d'ingénieurs. Compétences et expérience en machine learning. Bonnes compétences techniques en programmation et familier des bibliothèques d'apprentissage machine.

Mots-clés :

Apprentissage profond, vision par ordinateur, mathématiques appliquées. Des connaissances en robotique seraient un plus.

Modalités de candidature et date limite :

Envoyer votre dossier de candidature (CV, lettre de motivation, relevés de notes de licence, M1 et M2 ou équivalents), **en un seul fichier PDF** à catherine.achard@sorbonne-universite.fr et brahim.tamadazte@cnrs.fr.

Déposez ensuite votre candidature [ici](#) **avant le 24 avril 2026**.

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