

## Génération de modèles 3D de structures anatomiques par apprentissage profond à partir d'images 2D

**I. Contexte :** Le nombre d'interventions en chirurgie du rachis augmente de façon régulière, tant pour les cas liés à la traumatologie que pour les pathologies dégénératives. Dans ce second cas, la hausse s'explique entre autres par le vieillissement de la population et possiblement par des changements dans les habitudes de vie, comme une hausse de la sédentarité et de l'obésité. En plus de cette augmentation des cas de dégénérescence du rachis, on observe également une augmentation des capacités de diagnostic, de nouvelles modalités de traitement ainsi qu'un élargissement des indications cliniques. À titre d'exemple, environ 450 000 arthroèses ont été réalisées en 2014 aux seuls États-Unis, en hausse de 118 % depuis 1998 [1]. Le cas des fusions lombaires représentait à lui seul environ 200 000 interventions aux États-Unis en 2015, soit 62 % de plus par rapport à 2004, pour un coût de plusieurs dizaines de milliers de dollars par opération et un coût annuel total de plusieurs milliards de dollars. Au niveau mondial, plusieurs millions de vis dites pédiculaires sont ainsi placées annuellement dans le cadre de chirurgies rachidiennes.

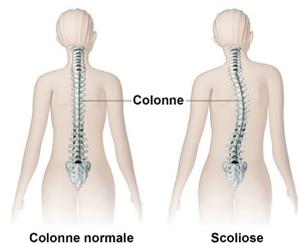


Fig. 1 : colonne vertébrale saine vs scoliose

Le traitement des scolioses (voir Fig. 1) est chirurgical. Il consiste à insérer des vis dans les pédicules vertébraux pour stabiliser la colonne. Ces vis sont connectées par des tiges permettant de corriger la courbure anormale en trois dimensions. Cette technique assure une fixation rigide, favorisant la fusion vertébrale et améliorant les résultats fonctionnels et esthétiques. La pose de ces vis s'avère complexe et difficile, en particulier chez certains patients. La littérature rapporte qu'en moyenne, sans système d'assistance, environ 24 % des vis pédiculaires sont mal positionnées [2], impliquant, à terme, des symptômes neurologiques potentiellement graves.

En parallèle d'une augmentation du volume de vis pédiculaires placées, le domaine de la chirurgie assistée par ordinateur a connu un essor important à travers le développement de solutions de navigation tridimensionnelle, de l'utilisation de la robotique ou encore des méthodes de réalité augmentée/mixte. Chacune de ces solutions apporte ses propres avantages et inconvénients. Par exemple, les systèmes de navigation rendent le placement de vis pédiculaires plus accessible aux chirurgiens juniors et réduisent certains risques et complications. Cependant, ils impliquent des coûts élevés, peuvent prolonger la durée des interventions chirurgicales et sont moins précis lorsque leur utilisation n'est pas optimale. La robotique ou encore la réalité augmentée/mixte apporte une valeur ajoutée clinique notamment dans la phase d'insertion des vis dans les pédicules en considérant que la planification des trajectoires d'insertion est connue.

**II. Objectifs scientifiques :** Dans un travail récent, en collaboration entre Sorbonne Université, l'Hôpital Trousseau et l'entreprise SpineGuard, nous avons levé plusieurs verrous scientifiques sur l'insertion des vis pédiculaires de manière sécurisée. Nous avons notamment développé une plateforme robotique de chirurgie du rachis fonctionnelle [3] ainsi que des méthodes de détection de brèches en temps-réel permettant de stopper la tâche d'insertion de la vis avant qu'une brèche ne soit créée dans le canal rachidien [4]. Cependant, les approches développées jusqu'à maintenant partent du postulat que la trajectoire 3D d'insertion de la vis dans le pédicule est connue précisément dans le monde réel.

Ce projet doctoral vise précisément à répondre à cette problématique d'estimation de la trajectoire 3D d'insertion des vis lors de l'intervention (Fig. 2). Actuellement, la planification des trajectoires est réalisée par le chirurgien sur de l'imagerie pré-opératoire (ex. CT scan). Ces trajectoires sont ensuite transposées sur le patient le jour de l'intervention, en supposant que le modèle 3D pré-opératoire correspond exactement à ce que voit le chirurgien.

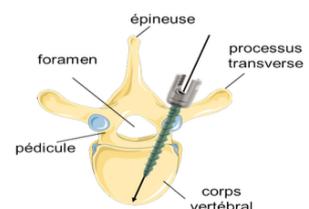


Fig. 2 : éléments constituant une vertèbre

Par ailleurs, le geste chirurgical en lui-même induit des déformations en temps-réel qui mettent à mal le recalage et la planification des trajectoires. Afin d'améliorer ce recalage et donc la précision des gestes de

chirurgie, nous souhaitons explorer l'utilisation d'un capteur visuel 2D conventionnel non-irradiant (e.g., caméra RGB) pour accéder, en temps réel, à la partie supérieure (visible) de la colonne vertébrale pendant l'opération [5]. En d'autres termes, cela revient à observer les épineuses et les processus transverses (voir Fig. 2). Le verrou scientifique que nous proposons d'explorer est de reconstruire en 3D chaque vertèbre en utilisant l'information visuelle 2D des images RGB grâce à des méthodes d'apprentissage profond. Cette discipline, relativement récente, a reçu un intérêt grandissant de la communauté Vision par Ordinateur, faisant significativement progresser l'état de l'art [6]. Ainsi, jusqu'à récemment, la reconstruction d'un modèle 3D nécessitait plusieurs vues 2D de l'objet/scène ou *a minima* de disposer d'une large base de données de paires images 2D – modèles 3D (e.g., CAO) annotées, ce qui limitait grandement le déploiement vers des disciplines comme la chirurgie à cause du manque de données annotées.

Pour répondre aux verrous scientifiques et aux besoins cliniques, plusieurs pistes de travail sont envisagées. Une première piste [7] consiste à générer des images 2D de synthèse à partir des modèles 3D, puis à faire de l'adaptation de domaine de manière à bénéficier d'un apprentissage auto-supervisé de la transformation 2D/3D. Cette méthode, proposée pour des objets rigides, pourrait être étendue aux objets non rigides grâce aux champs de vecteurs de déplacement introduits dans [8]. Une autre piste, qui semble prometteuse, est issue des travaux récents permettant de reconstruire un modèle 3D à partir d'une simple vue 2D [9][10][11]. Les outils employés par ces méthodes, et notamment les triplans, pourraient être utilisés pour notre application, en les déployant localement pour chaque vertèbre. Un réseau de contexte de scène [5] basé sur un graphe pourrait ensuite affiner la pose 3D initiale de chaque vertèbre et leur agencement relatif. Nous disposons déjà d'une base de données de vertèbres segmentées et annotées issues de scans de patients que nous enrichissons continuellement. En conséquence, la prédiction de la forme 3D des vertèbres à partir des images 2D peut être enrichie par l'information 3D des scans.

**3. Equipe encadrante :** elle sera constituée de **Brahim Tamadazte** (DR CNRS, ISIR, SU), **Catherine Achard** (PU, ISIR, SU) et **Raphaël Vialle** (PUPH, APHP, Hôpital Trousseau, SU). La collaboration entre l'ISIR et l'Hôpital Trousseau est bien établie, notamment à travers la participation au projet EU H2020 FAROS, au projet FHU SpineMed2, ou encore au projet ANR RODEO, donnant lieu à plusieurs co-encadrements de thèses (3) et médecins-stagiaires (2). Ces collaborations ont permis de structurer une activité de recherche importante autour de l'utilisation de la robotique, de la vision par ordinateur et de l'IA pour améliorer les protocoles de chirurgie du rachis.

Nous avons l'habitude, dans ce type d'encadrement entre l'ISIR et un centre hospitalier, d'associer un ou plusieurs médecins-internes qui viennent réaliser des stages de master d'une durée de 6 à 12 mois. Cela permet une meilleure interaction entre le monde médical et la recherche académique. Ce modèle a largement fait preuve de sa capacité translationnelle, donnant lieu à la création de plusieurs entreprises (Basecamp Vascular, MovaLife) ou à la commercialisation de dispositifs médicaux via des entreprises spécialisées (Endocontrol, Koelis, GEMA, Moon Surgical, GE Healthcare, Robeauté et SpinGuard).

#### 4. Références bibliographiques

- [1] *Trends in lumbar spinal fusion-a literature review*. J Spine Surg. 2020 Dec;6(4):752-761. doi: 10.21037/jss-20-492. PMID: 33447679;
- [2] *The accuracy of pedicle screw placement using intraoperative image guidance systems*. J Neurosurg Spine. 2014 20(2):196-203.
- [3] *Automatic spinal canal breach detection during pedicle screw placement*. In Robotics and Automation Letters (2024), doi: 10.1109/LRA.2024.3349947
- [4] *Breach Detection in Spine Surgery Based on Cutting Torque*, in *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 1084-1092, doi: 10.1109/TMRB.2024.3421543
- [5] *Pedicle Drilling Planning Transfer for Spine Surgery Using Functional Map Correspondences*. In *IEEE/RSJ IROS*, pp. 6947-6952, 2024.
- [6] *Single image 3D object reconstruction based on deep learning: A review*. *Multimedia Tools and Applications*, 80(1), 463-498
- [7] *Self-supervised 2D/3D registration for X-ray to CT image fusion*. In *IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision* (pp. 2788-2798), 2023.
- [8] *Image-to-Volume Deformable Registration by Learning Displacement Vector Fields*. *IEEE T. on Radiation and Plasma Medical Sciences*. 2025
- [9] *Learning single-image 3d reconstruction by generative modelling of shape, pose and shading*. *IJCV*, 128(4), 835-854, 2020.
- [10] *Triplane meets gaussian splatting: Fast and generalizable single-view 3d reconstruction with transformers*. In *IEEE/CVF CVPR* pp. 10324-10335), 2023.
- [11] *Holistic 3d scene understanding from a single image with implicit representation*. In *IEEE/CVF CVPR* pp. 8833-8842, 2021