



UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG
Année : 2023

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

Chirurgie du rachis robot-assistée : initiation et perspectives

Présentée et soutenue publiquement le 22 septembre 2023 à 18 heures
au Pôle Formation
par **Malick SAGENLY**

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Richard ASSAKER

Asseseurs :

Monsieur le Professeur Jean-Paul LEJEUNE

Monsieur le Docteur Laurent DO

Monsieur le Docteur Christian DURIEZ

Directeur de thèse :

Monsieur le Docteur Henri-Arthur LEROY

Travail du Service de Neurochirurgie

Avertissement

La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs.

Résumé

La robotique chirurgicale, représente une avancée majeure en matière de soins. Elle contribue à davantage de précision et de sécurité du geste chirurgical. Largement diffusée au sein de spécialités comme la neurochirurgie, la chirurgie viscérale ou l'urologie, son utilisation en chirurgie du rachis est récente et peu développée. Nous proposons, à travers l'expérience lilloise de décrire l'initiation d'une équipe neurochirurgicale à la chirurgie robot-assistée du rachis en étudiant sa courbe d'apprentissage, le flux de travail mais aussi les complications potentielles et les perspectives de cette technologie.

Son acquisition requiert un plateau technique adapté et son utilisation nécessite une formation théorique et pratique de l'équipe chirurgicale. Une collaboration étroite entre l'équipe chirurgicale et les ingénieurs est impérative pour garantir un usage et des résultats optimaux du système robotisé. La planification préopératoire est une étape majeure qui repositionne le patient au centre de la réflexion du chirurgien et contribue au développement d'une chirurgie plus personnalisée. Nombreuses sont les indications qui peuvent faire l'objet d'une chirurgie robot assistée du rachis. L'installation est une étape chronophage. Nous avons observé une tendance à la diminution de nos durées opératoires à mesure des cas opérés et l'absence de complications graves.

La chirurgie du rachis robot-assistée contribue à l'amélioration des soins et à leur standardisation pour une meilleure prise en charge de nos patients. Elle semble répondre à une courbe d'apprentissage courte qu'il conviendra de mettre en évidence par des études à plus long terme et, doit faire face à certaines limites, notamment techniques et de coût. Cependant, elle se développe progressivement et génère de concert avec l'intelligence artificielle des perspectives nouvelles de meilleure assistance à la correction de déformation, de technologies plus autonomes pour la réalisation de certaines tâches sous la supervision du chirurgien et alimente la possibilité de téléchirurgie.

Table des matières

1-	Introduction	13
1.1-	Définitions.....	17
1.2-	Composition du système robotique utilisé.....	18
1.3-	Alternatives de plateformes robotiques en chirurgie du rachis	19
2-	Formation du personnel.....	20
2.1-	Équipe chirurgicale.....	21
2.2-	Équipe paramédicale.....	21
3-	Plateforme technique	22
3.1-	Bloc opératoire.....	22
3.2-	Table d'intervention	22
3.3-	Amplificateur de brillance et tomographie intraopératoire	23
4-	Période préopératoire.....	23
4.1-	Sélection du patient	23
4.2-	Planification chirurgicale	24
5-	Installation	25
5.1-	Le patient	25
5.2-	Le cobot : montage et calibration	26
5.3-	L'équipe chirurgicale.....	30
6-	Abords chirurgicaux et insertion des implants.....	31
6.1-	Percutané	32
6.2-	A ciel ouvert	32
6.3-	Insertion des implants.....	32
7-	Possibilités du guidage robotisé.....	36
7.1-	Vis pédiculaires	37
7.2-	Dispositifs intersomatiques.....	37
7.3-	Résection osseuse	38
8-	Expérience lilloise.....	38
8.1-	Démographie.....	39
8.2-	Indications chirurgicales : série de cas	41
8.3-	Évolution des durées opératoires.....	46
9-	Discussion, limites et perspectives.....	50
9.1-	Discussion.....	50
9.2-	Limites.....	53
9.3-	Perspectives	53
10-	Conclusion.....	54

Références bibliographiques.....	55
Annexes.....	58
ASA Physical Status Classification System	58
Échelle d'incapacité d'Oswestry.....	59

1- Introduction

L'écosystème du milieu de la santé est en pleine mutation avec l'intégration croissante de technologies innovantes liées au numérique. Ces bouleversements à l'œuvre envisagent de réduire la pénibilité du travail, d'améliorer la sécurité et la qualité des soins. On peut citer l'hypnose par réalité virtuelle [1], la télémédecine, les algorithmes diagnostiques en radiologie [2] ou dermatologie [3], l'impression 3D de prothèses mais aussi la bio-impression de tissus [4] et, potentiellement dans les années à venir d'organes transplantables [5]. La robotique médicale fait partie de ces innovations technologiques en plein essor et plus particulièrement en chirurgie, milieu où la précision et la reproductibilité permettent d'optimiser les résultats opératoires.

Le repérage spatial, a fortiori tridimensionnel a toujours représenté un enjeu majeur neurochirurgical. La précision y est d'autant plus nécessaire que les tissus traversés ou à proximité du foyer chirurgical sont souvent fonctionnels, exposant le patient en cas de lésions iatrogènes à un déficit neurologique transitoire ou permanent, voire au décès. L'histoire de la neurochirurgie est jalonnée d'évolutions technologiques en lien avec un meilleur repérage anatomique. Il s'agit par exemple de l'apport de l'imagerie tridimensionnelle par tomodensitométrie [6] et imagerie par résonance magnétique [7] qui a facilité la représentation mentale de l'anatomie par le chirurgien qui devait autrefois s'astreindre à l'extraction des données de l'imagerie bidimensionnelle afin de se représenter les structures anatomiques mais également localiser une lésion. La nécessité de précision du geste chirurgical comme garantie d'une procédure sûre et reproductible a participé à l'émergence de la stéréotaxie. L'invention de l'appareil stéréotaxique de Horsley et Clarke en 1908 [8] et, dès la fin des années 1940 du cadre stéréotaxique de Leksell avec la radiochirurgie [9] et du cadre stéréotaxique de Talairach [10] en sont des exemples. Ces avancées ont contribué à la genèse d'une cartographie cérébrale par le repérage tridimensionnel d'une structure cérébrale sans déformation optimisée par un ensemble de repères d'axes telle que la ligne bicommissurale dite « CA-CP » [10]. Cet apport en matière de précision dans le repérage des structures cérébrales et par conséquent de sécurité du geste chirurgical a permis d'envisager l'abord de zones profondes et fonctionnelles du système nerveux central concourant ainsi de façon significative à l'essor de techniques nouvelles. En témoignent la réalisation de la première pallidotomie en conditions stéréotaxiques par Spiegel en 1947 [11], l'avènement de la stimulation cérébrale profonde et de la stéréo-électroencéphalographie, entres autres. Les données de cartographie cérébrale demeurent encore utilisées de nos jours et sont intégrées

à des systèmes informatiques. Il en émerge dans les années 1990 avec la contribution de l'imagerie tridimensionnelle, le concept de chirurgie assistée par ordinateur. Ainsi la neuronavigation [12] améliore la précision et la sécurité du geste chirurgical en superposant l'imagerie 3D à l'anatomie du patient par un système de repérage par triangulation, facilitant l'orientation du chirurgien en per opératoire. Aujourd'hui, la neuronavigation fait incontestablement partie de l'arsenal neurochirurgical. Désormais, l'enjeu est l'actualisation des données de navigation au cours du geste chirurgical. L'usage de l'IRM peropératoire durant la chirurgie des tumeurs cérébrales, en particulier les gliomes, en est un exemple. Cette technologie a fait preuve de son efficacité en optimisant le taux d'exérèse des gliomes, ce qui est corrélé à une augmentation de la survie des patients [13,14].

Une nouvelle étape dans le gain de précision et de reproductibilité a été franchie avec l'avènement de la robotique médicale. Il s'agit souvent de bras articulés guidant le geste du chirurgien, sans pour autant réaliser d'acte autonome.

Différents besoins sont à l'origine de la conception des robots médicaux. Le premier robot chirurgical est le PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) [15]. Conçu en Californie dans les ateliers de General Motors, la version PUMA 200 est utilisée la première fois en 1985 pour réaliser des biopsies cérébrales en condition stéréotaxique dans le but d'améliorer la stabilité du geste (Figure 1). Un autre robot, l'Arthrobot, a lui été créé dans le but d'améliorer l'assistance opératoire per procédurale. Celui-ci par guidage vocal permettait de délivrer de manière rapide et fiable les instruments chirurgicaux appropriés au chirurgien. Le robot Sensei (figure 1) a quant à lui permis de rendre accessible des traitements endovasculaires de trouble du rythme cardiaque en guidant l'introduction de cathéters dirigeables [16]. Enfin, le robot Da Vinci (figure 1) a rendu accessibles et opérables des lésions jugées difficilement extirpables, en particulier en chirurgie viscérale, gynécologique et urologique [17,18].

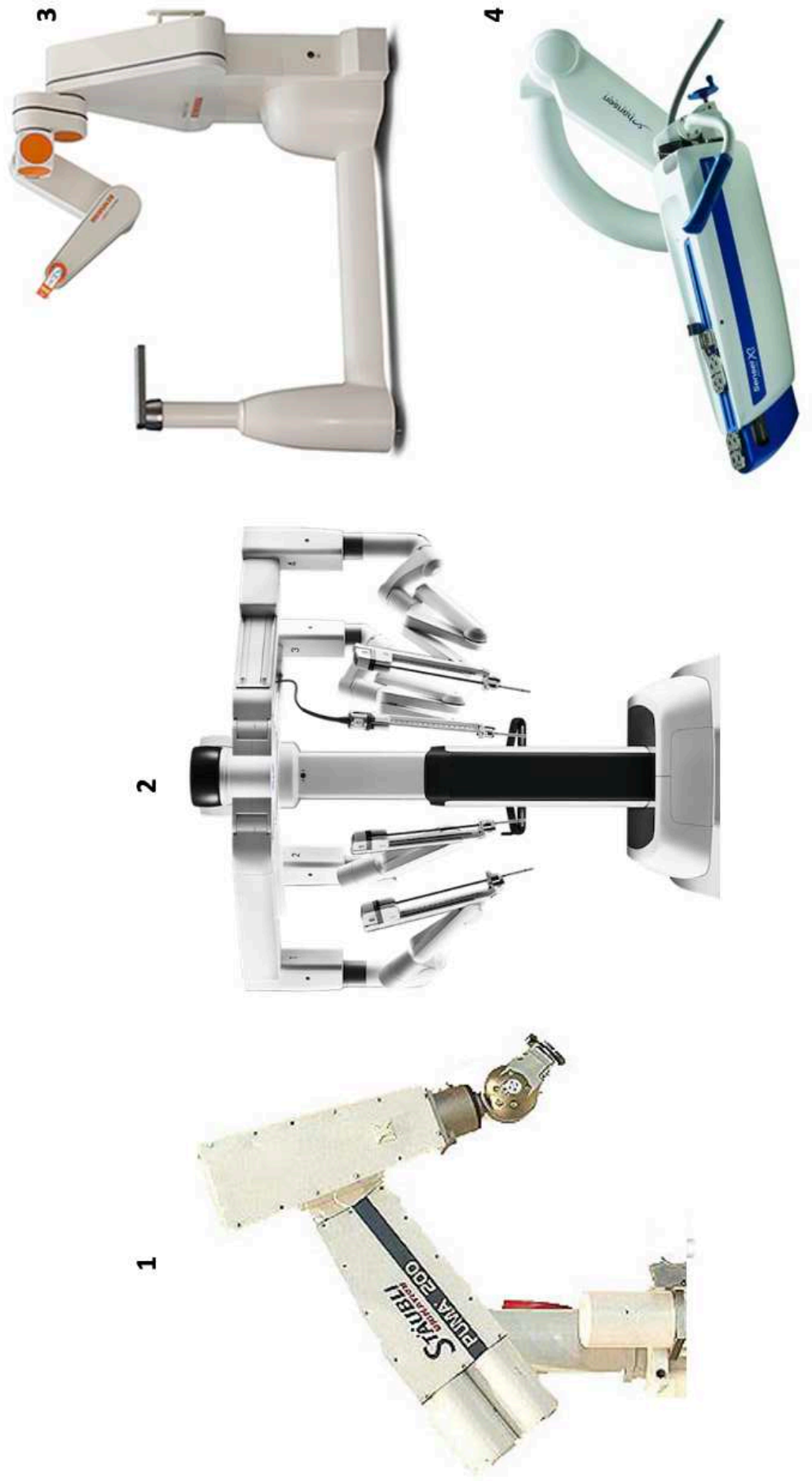
En neurochirurgie, l'introduction de la chirurgie robotisée débute à Grenoble dans les années 1990 par le développement du Neuromate® (Renishaw, figure 1) utilisé pour la réalisation de biopsies stéréotaxiques ou encore le positionnement d'électrodes [19], marquant l'avènement de la neurochirurgie stéréotaxique robotisée. En chirurgie du rachis, l'un des enjeux était d'optimiser la mise en place des implants vertébraux (vis, cages). En 2014, l'équipe du Pr M. Lefranc a publié le cas d'une ostéosynthèse rachidienne percutanée assistée par robot (Rosa, Medtech) réalisée chez un patient souffrant de lomboradiculalgie d'origine dégénérative [20]. Cet usage de la robotique en chirurgie du rachis offre des possibilités tels

un choix des points d'entrée, des trajectoires des vis et contribue ainsi à une meilleure épargne des facettes articulaires adjacentes et tenue des vis [21,22].

Le champ d'application de cette technologie est vaste et nécessite une adaptation à l'interface homme/machine. Pour satisfaire à cet objectif de plus-value de qualité des soins par l'appropriation de la robotique chirurgicale en chirurgie du rachis, une évaluation de la courbe d'apprentissage apparaît nécessaire. La courbe d'apprentissage de la chirurgie du rachis robot-assistée en milieu universitaire français n'a pour l'heure pas fait l'objet de publication.

Au travers de l'expérience lilloise, nous proposons de décrire l'initiation d'une équipe neurochirurgicale à la chirurgie robot-assistée en étudiant sa courbe d'apprentissage, le flux de travail mais aussi les complications potentielles. Nous rapporterons également comment l'usage de cette technologie a favorisé l'émergence de nouvelles approches vis-à-vis des pathologies traitées.

Figure 1: robots chirurgicaux



1: robot PUMA 200 (Ultimation); 2: robot Da Vinci (Intuitive Surgical); 3: robot Sensei (Hansen Medical); 4: robot Neuromate (Renishaw)

1.1- Définitions

Un robot correspond à un appareil effectuant grâce à un système de commande automatique à base de microprocesseur, une tâche précise pour laquelle il a été conçu dans le domaine industriel, scientifique ou domestique. Le terme « robot » est issu du mot tchèque « robota » qui désigne un travail pénible, corvée. Il trouverait son origine dans la pièce de théâtre « R.U.R » (Rossum's Universal Robots) datant de 1920 dans laquelle des machines sont créées pour effectuer le travail laborieux et répétitifs pour les humains [23].

La robotique à ses débuts consistait en des entités électromécaniques simples et, a principalement connu un essor dans le milieu industriel au sein des unités de production afin de réaliser des tâches répétitives et dangereuses dans les années 1950 [24]. De concert avec le déploiement de l'informatique, la création de capteurs (thermiques, barométriques, ...), la robotique se perfectionne et se diffuse dans des milieux à haut niveau d'exigence en matière de précision et de sécurité telle l'aéronautique (figure 2).



Figure 2 : Automatisation d'une chaîne de production d'avions (robots industriels à bras articulés KUKA)

Plusieurs classifications des robots existent et témoignent de leur forte hétérogénéité. En effet, ils peuvent être classés selon leur degré d'autonomie, leur mobilité, leur apparence et leur domaine d'application.

Les robots médicaux constituent un dispositif mécatronique. Cela signifie qu'ils allient simultanément et en symbiose la mécanique, l'électronique, l'automatique, et l'informatique. L'ensemble de ces éléments sous-tend l'idée de la réalisation de l'intégralité d'une tâche par le robot en autonomie. Cependant, en chirurgie et plus particulièrement en chirurgie du rachis, les robots sont en réalité des cobots. Il s'agit d'un néologisme issu de la fusion des mots collaboration et robotique. Cela signifie qu'ils n'effectuent pas d'acte autonome mais vont assurer au chirurgien stabilité et précision au cours du geste opératoire.

1.2- Composition du système robotique utilisé

Le système robotique utilisé au CHU de Lille en chirurgie rachidienne est le Mazor X Stealth Edition (Medtronic). Il se compose de 3 éléments que sont le poste de travail, le système chirurgical et la caméra de navigation (figure 3).



Figure 3 : système Mazor X Stealth Edition (Medtronic)

Le poste de travail, interface d'interaction homme/machine, comporte une console permettant d'importer la planification préopératoire, les clichés fluoroscopiques peropératoires et de contrôler le bras chirurgical par l'ordinateur intégré. Ce poste dispose d'un bouton d'arrêt d'urgence permettant l'arrêt du système en cours de procédure si besoin.

Le système chirurgical est rangé dans le poste de travail. Il est constitué d'un positionneur, d'une épaule, du bras chirurgical et de son élément de guidage, de la caméra Mazor X Eye et d'un écran tactile. Il dispose également d'un bouton d'arrêt d'urgence.

Un manipulateur présent sur le poste de travail permet la mobilisation du système chirurgical. Il facilite le montage du système chirurgical par l'intermédiaire de son positionneur sur un cadre de lit fixé au préalable à la table d'intervention. Ce dispositif est spécifique des robots fixés à la table d'intervention en comparaison aux robots non fixés qui sont plus massifs.

L'ajustement dans les plans verticaux et horizontaux de la position du bras chirurgical par rapport au patient est assuré par l'épaule du système chirurgical avant fixation.

Le bras chirurgical est ensuite fixé à l'anatomie osseuse du patient en début de chirurgie. Il peut être contrôlé depuis le poste de travail ou l'écran tactile du système chirurgical. Il comprend une caméra de cartographie de surface calculant le volume de travail une fois la surface d'intervention balayée.

A l'extrémité distale du bras chirurgical, l'élément de guidage permet de guider les instruments chirurgicaux placés au sein d'un canal de guidage mais aussi de positionner le marqueur 3D lors de l'acquisition d'images fluoroscopiques.

La caméra de navigation est équipée d'un laser infrarouge et est en pratique courante utilisée pour la réalisation de l'ensemble des interventions.

1.3- Alternatives de plateformes robotiques en chirurgie du rachis

En 2021, le marché de la robotique chirurgicale était évalué à environ 6,2 milliards de dollars avec des perspectives de croissance pouvant atteindre 27,4 milliards en 2030 soit un taux de croissance annuelle aux alentours de 18 % [25]05/09/2023 13:51:00. Depuis l'approbation en 2004 par la Food and Drug Administration (FDA) du robot SpineAssist commercialisé par Medtronic pour la chirurgie du rachis, de nouvelles générations de ce cobot ont été commercialisées, ainsi que d'autres modèles issus de firmes concurrentes. En effet, 5 cobots pour la chirurgie du rachis dominent le marché mondial de la chirurgie du rachis assistée par robot. Il s'agit du robot Cirq® (Brainlab), de l'Excelsius GPS® (Globus Médical),

de la 4ème génération du SpineAssist® ou Mazor X Stealth Edition® (Medtronic), du robot ROSA® (Zimmer Biomet) et du TiRobot® (Beijing Tinavi Medical Technologies Co). La figure 4 illustre ces différentes plateformes. Ces systèmes se répartissent en deux grandes catégories : fixé à la table opératoire ou non.



Figure 4 : Exemple de plateformes robotiques en chirurgie du rachis

1: Mazor X Stealth Edition® (Medtronic); 2: Cirq® (Brainlab); 3: ROSA® (Zimmer Biomet); 4: Excelsius GPS® (Globus Medical); 5: TiRobot® (Beijing Tinavi Medical Technologies Co).

2- Formation du personnel

L'acquisition d'une nouvelle technologie nécessite une formation préalable et un accompagnement au cours des premiers usages. La formation des équipes médicale et paramédicale s'est déroulée suivant des modalités prédéfinies par le fabricant du robot. Ce planning de formation a ensuite été ajusté aux besoins de l'équipe.

2.1- Équipe chirurgicale

Une formation, théorique mais surtout pratique, est dispensée à l'équipe chirurgicale en laboratoire, en présence de chirurgiens experts. La formation comprend des entraînements à la planification préopératoire, à l'installation au bloc opératoire et à la réalisation de la procédure. L'équipe lilloise a bénéficié de sessions de formation à l'académie ORSI (OLV Robotic Surgery Institute) en Belgique (figure 5).



Figure 5 : Académie ORSI (Melle, Belgique), centre d'innovation et de formation à la robotique

Enfin, une simulation préopératoire est organisée la veille de la première intervention chirurgicale ou d'interventions dont la complexité technique est envisagée. Les membres de l'équipe chirurgicale sont mis en situation et disposent d'un accompagnement par le partenaire industriel qui garantit la présence d'un ingénieur en robotique à chaque étape de la formation. Cela contribue au bon déroulement de l'opération.

2.2- Équipe paramédicale

L'équipe paramédicale est aussi formée au préalable. Des référents seront définis pour les interventions de chirurgie du rachis robot-assistée, garantissant la sécurité de la procédure.

3- Plateforme technique

3.1- Bloc opératoire

La salle d'intervention doit être de dimensions suffisantes pour recevoir et permettre la circulation fluide du matériel. En sus des paramètres habituels incombant à une salle d'intervention chirurgicale, il est nécessaire que la salle soit plombée en raison de l'usage de rayonnements X. Un sol renforcé est indispensable à l'utilisation d'un système d'imagerie de type tomographie intraopératoire. L'ensemble du système robotique Mazor X pèse près de 300 kg et la tomographie intraopératoire pèse aux alentours d'une tonne.

3.2- Table d'intervention

La table d'opération recommandée par le fabricant pour l'utilisation du système Mazor X est une « table d'opération standard ou une table d'opération à cadre ». A l'instar des tables utilisées habituellement en chirurgie rachidienne, la table d'opération doit être radiotransparente, permettre une installation sécurisée du patient et la réalisation de l'intervention dans des conditions ergonomiques. La table d'opération doit être pourvue de rails pour assurer la bonne fixation du cadre de lit du système Mazor X. Elle doit également permettre une mobilisation du patient dans son intégralité afin de conserver la fiabilité de la navigation. En effet, il n'est pas recommandé de modifier indépendamment la position de segments du corps du patient comme ses jambes ou son tronc au cours de la procédure sous peine de perdre la coregistration. Après avoir expérimenté initialement la table Allen Spine, nous utilisons désormais une table d'opération radio-transparente standard devant les limitations de mobilisation du patient liées entre autres aux contraintes de mobilité de la partie céphalique. Une attention particulière doit être apportée au support antérieur de la tête afin d'éviter toute pression prolongée sur les yeux, étant donné que la têtère à pointe n'est pas compatible avec la table carbone utilisée.

3.3- Amplificateur de brillance et tomographie intraopératoire

L'imagerie occupe une place importante en chirurgie du rachis. Elle permet l'analyse de l'anatomie du patient, la planification de l'intervention chirurgicale et le contrôle du geste. L'utilisation de l'imagerie en chirurgie du rachis assistée par robot peut s'envisager selon deux grandes modalités que sont le « scan and plan » et le « CT to fluoro ». Le « scan and plan » présuppose de disposer d'une imagerie préopératoire de type tomodensitométrie nécessaire à la planification en amont du geste chirurgical via l'application de planification sur PC. La seconde modalité, « CT to fluoro », consiste en la réalisation d'une imagerie per-opératoire, dans notre pratique la tomographie intra-opératoire puis d'effectuer la planification chirurgicale. Ces deux modalités précédentes se poursuivent par l'acquisition d'images fluoroscopiques par un amplificateur de brillance de type arc de fluoroscopie et d'un adaptateur d'image pour effectuer des radiographies en incidences de face et oblique nécessaires à la mise en concordance la navigation.

Cela semble une évidence mais il paraît tout de même nécessaire de rappeler ici la nécessité des mesures de radioprotection en cas d'usage de systèmes d'imagerie par irradiation pour la protection du patient et de l'équipe soignante. Dans cet objectif, la réalisation du scanner en préopératoire permet de réduire l'exposition de l'équipe chirurgicale. Dans ce cas, il est possible en seulement 2 clichés de fluoroscopie (face et oblique) peropératoires de procéder au recalage.

4- Période préopératoire

4.1- Sélection du patient

La sélection du patient est essentielle à la réussite du geste chirurgical. Au sein du manuel d'utilisation du robot, il est notifié : « La population de patients pour laquelle le système Mazor X est utilisé est celle des patients pour lesquels la chirurgie stéréotaxique du rachis est jugée appropriée. » Cela sous-entend que la sélection du patient reste soumise à l'approbation du chirurgien sans contre-indication formelle. Les morphotypes obèses morbides posent un problème, ainsi que les patients atteints d'ostéoporose sévère. Dans ces deux cas, le recalage scopique est rendu extrêmement difficile. En effet, l'algorithme de reconnaissance des corps vertébraux peut être pris en défaut par le manque de contraste de

l'imagerie, notamment lié à l'atténuation des rayons X. L'algorithme peut ainsi être pris en défaut et échouer dans la mise en correspondance des niveaux à opérer. Dans une telle situation, une alternative doit être envisagée, soit la réalisation d'une acquisition 3D intraopératoire (OARM), soit la décision de ne pas utiliser le robot lors la chirurgie.

4.2- Planification chirurgicale

Comme mentionné précédemment, la planification chirurgicale est une étape indispensable en chirurgie du rachis assistée par robot que l'on soit en « scan and plan » ou en « CT to fluoro ».

La planification s'effectue après importation à l'aide d'un support de stockage externe d'une imagerie tomodensitométrique en coupe fines (1mm) sur l'application Planification Mazor X, installée au préalable sur un ordinateur depuis un CD fourni ou retrouvée au sein de l'interface utilisateur Mazor X. Le dossier patient est sélectionné parmi une liste de patients puis une fenêtre d'information sur l'étude s'affiche avec des boutons de fonction. Le bouton « scan & plan » permet d'accéder à l'écran de planification. Il est nécessaire dans un premier temps de déterminer les vertèbres aux extrémités de la région d'intérêt puis de tracer le canal rachidien (figure 6).

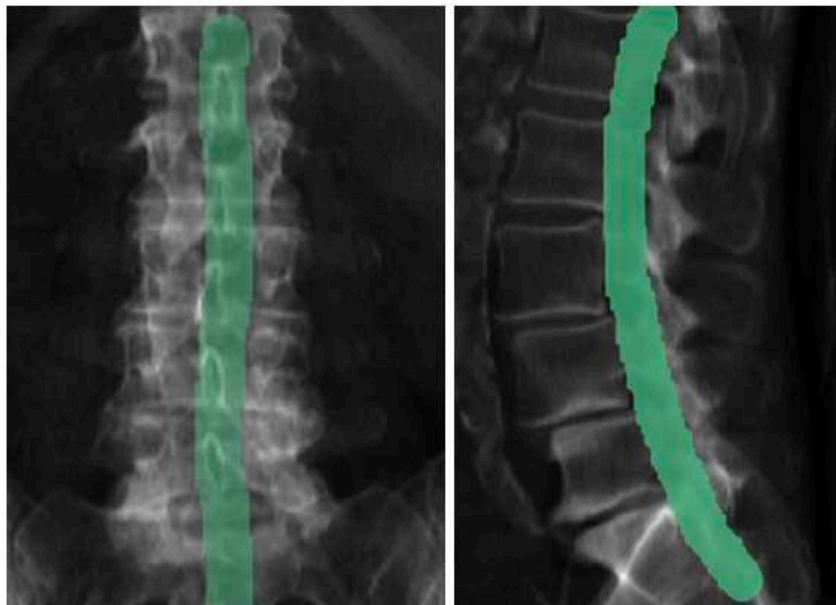


Figure 6 : traçage du canal rachidien

Les segments vertébraux sont numérotés. A l'issue de ces étapes, l'application effectue une segmentation vertébrale. Cette dernière permet une analyse individuelle de chaque vertèbre

dans des conditions anatomiques optimisées permettant au chirurgien une planification préopératoire de l'insertion des vis en définissant les points d'entrée, les trajectoires et l'angulation souhaitées des vis dans les différents plans (axial, coronal, sagittal). L'alignement des têtes de vis peut être optimisé en visualisant virtuellement la future tige. Une angulation focale trop importante peut ainsi être ajustée et ainsi faciliter la mise en place de la tige en fin d'intervention.

Outre la planification préopératoire de l'insertion des vis, l'application Mazor X propose des fonctionnalités de planification de l'insertion de dispositifs intersomatiques, de mesures de longueur ou d'angles (angle de rotation, angle de Cobb) ou encore de planification de l'incision. La planification de l'incision, effectuée de façon automatique ou manuelle, est un outil précieux pour obtenir une cicatrice la plus anatomiquement adaptée et ainsi limiter les troubles de cicatrisation.

Une fois la planification chirurgicale réalisée, elle est exportée vers le poste de travail du robot via un support de stockage externe.

5- Installation

5.1- Le patient

Le patient doit être immobilisé de manière stricte afin de limiter tout glissement ou « shift », pouvant contribuer à la perte de précision, voire la perte totale de recalage et la mise en sécurité du bras robotisé. Pour ce faire, nous utilisons entre autres, des cales et des bandes adhésives. En dehors de ces précautions particulières, l'installation du patient répond aux exigences d'une installation classique de chirurgie rachidienne. En effet, les points d'appui du patient doivent être protégés et l'installation doit faciliter l'accès à la voie d'abord choisie avec la meilleure ergonomie possible pour le chirurgien mais également pour les membres de l'équipe chirurgicale et anesthésique. Nous installons le patient avant la fixation du cadre de lit et le montage du système chirurgical. Cela permet de monter d'emblée le système chirurgical dans une position optimale.

5.2- Le cobot : montage et calibration

Les étapes d'installation du robot sont à réaliser par un personnel formé. La première étape consiste en la fixation du cadre de lit à la table d'opération. Le cadre de lit est fixé aux rails de la table d'opération par ses supports de fixation, à une distance d'environ 50cm en distalité de la zone d'intérêt chirurgicale. Le cadre de lit est extensible pour une adaptation aux différents types de tables. On procède ensuite à la mise en tension du système après raccordement des câbles. Une diode s'illumine en vert sur la caméra de navigation. Une fois le système connecté, la configuration du bras robotisé et de l'arc de fluoroscopie est effectuée. Le système chirurgical est monté à l'aide du manipulateur sur le cadre de lit par l'intermédiaire de la plaque de montage de ce dernier (figure 7).



Figure 7 : montage du système chirurgical

De gauche à droite : système chirurgical monté, cadre de lit (flèche bleu) et plaque de montage (flèche verte).

Le système chirurgical est drapé en condition stérile ; le personnel en charge du drapage se plaçant idéalement en face et à droite du système chirurgical élevé aussi haut, placé le plus à droite que possible puis envoyé en position de drapage (figure 8).



Figure 8 : étapes du drapage du système chirurgical

De gauche à droite : système chirurgical en position de drapage, drapage en cours, système chirurgical drapé.

Une fois champé, le chirurgien connecte le bras robotisé à l'anatomie osseuse du patient. Il est possible de s'amarrer soit à l'épine iliaque postéro-supérieure pour le segment lombosacré à l'aide d'une vis de Schanz, ou de choisir une fixation aux processus épineux pour les niveaux supérieurs, par clamp ou bien par vis (figure 9). Cette étape est cruciale afin de garantir une précision optimale des mouvements du robot, ainsi que du repérage des instruments navigués. On procède ensuite au verrouillage du support (figure 8), après sélection de la position du patient (décubitus ventral ou latéral), pour éviter tout mouvement. Il est essentiel à partir de ce stade d'éviter toute pression externe sur le patient pouvant altérer la précision de l'enregistrement.

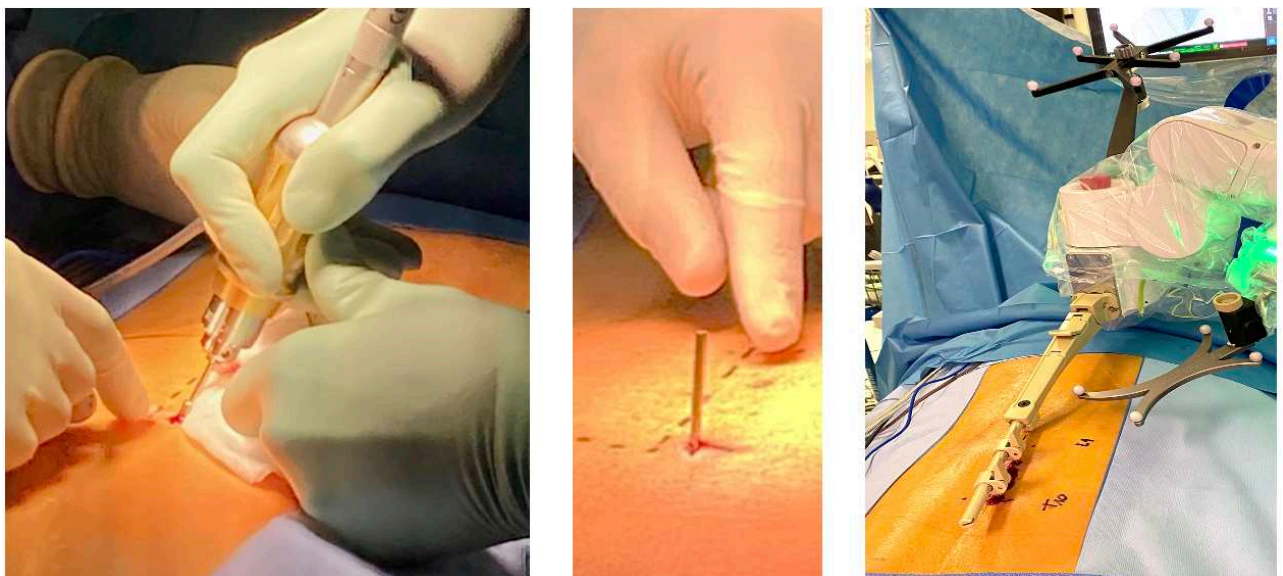


Figure 9 : fixation du bras chirurgical à l'anatomie osseuse du patient

De gauche à droite : Insertion d'une vis de Schanz dans un processus épineux, vis de Schanz insérée, bras chirurgical fixé à l'anatomie osseuse du patient par l'intermédiaire de son support lié à 2 vis de Schanz.

Après avoir sélectionné la rubrique « Scan 3Define », la caméra intégrée à l'extrémité du bras robotisé se déplace autour du champ opératoire afin de définir un volume de travail tridimensionnel (Figure 10). Cela permet d'éviter tout risque de collision du bras en mouvement avec le patient, bien que la vigilance de l'équipe chirurgicale doive être permanente. Par la suite, une photographie instantanée est réalisée pour mettre en correspondance la position du cadre de référence avec celle du bras chirurgical. L'acquisition de l'instantané se fait en sélectionnant l'icône « Snapshot Position » puis en connectant l'outil de suivi instantané à l'élément de guidage du bras et en sélectionnant l'icône « Acquire ». Le cadre de référence ne doit pas être déplacé après la réalisation de l'instantané ; tout déplacement à partir de cette étape engendrerait un manque de précision de la navigation voire la mise en sécurité du bras chirurgicale et la nécessité de reproduire l'ensemble des étapes sus citées.

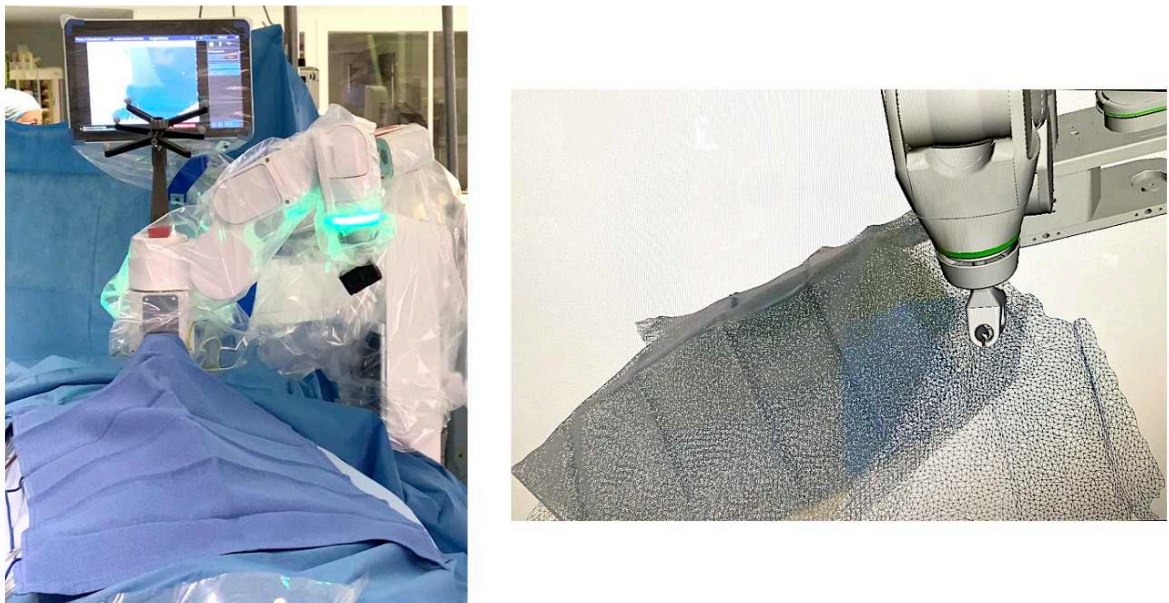


Figure 10 : Définition du volume de travail tridimensionnel par la caméra de cartographie de surface à l'extrémité du bras robotisé

De gauche à droite : photographie peropératoire de la définition du volume de travail par la caméra, reconstruction du volume de travail tridimensionnel par le logiciel

L'étape suivante consiste en la définition des extrémités crâniale et caudale du segment rachidien d'intérêt suivie de l'acquisition d'images fluoroscopiques en incidences antéro-postérieure et oblique. Le marqueur 3D est connecté à l'extrémité du bras robotisé. Ce dispositif consiste en des marqueurs dont la position sur chaque incidence fluoroscopique

réalisée permettra une reconstruction 3D à partir de matrices de projection. L'arc de fluoroscopie est placé dans l'incidence souhaité tout en étant parallèle à la surface du marqueur 3D et le plus proche de celui-ci (Figure 11).



Figure 11 : marqueur 3D et cliché fluoroscopique

De gauche à droite : marqueur 3D fixé à l'extrémité du bras chirurgical et placé au plus près du patient, amplificateur de brillance parallèle à la surface du marqueur 3D et au plus près de celui-ci, rachis et marqueur 3D sur cliché fluoroscopique.

L'algorithme de recalage compare alors ces deux clichés de scopie au scanner préopératoire puis enregistre chaque position des corps vertébraux. Le maximum de niveaux vertébraux exploitable en une acquisition est de 4 ou 5. Il s'en suit une segmentation permettant d'individualiser chaque corps vertébral de la zone d'intérêt en marquant une vertèbre d'un point rouge sur les clichés radioscopiques et sur le scanner per-opératoire pour les faire correspondre. Les vertèbres sont labellisées sous le contrôle du chirurgien référent. Il est ensuite procédé à la vérification de la correspondance entre les images fluoroscopiques et le scanner par un procédé de fusion d'images. Une vérification finale niveau par niveau est réalisée. En cas d'enregistrement non conforme, le bras robotisé ne pourra pas être utilisé au niveau concerné. Il est important de préciser que l'algorithme de reconnaissance des vertèbres se base uniquement sur les corps vertébraux et les analyse de manière individuelle (Figure 12). Cela permet de pallier d'éventuels déplacements de vertèbres lors de l'intervention (ex : à la suite d'une manœuvre de distraction intersomatique, ou ostéotomie).

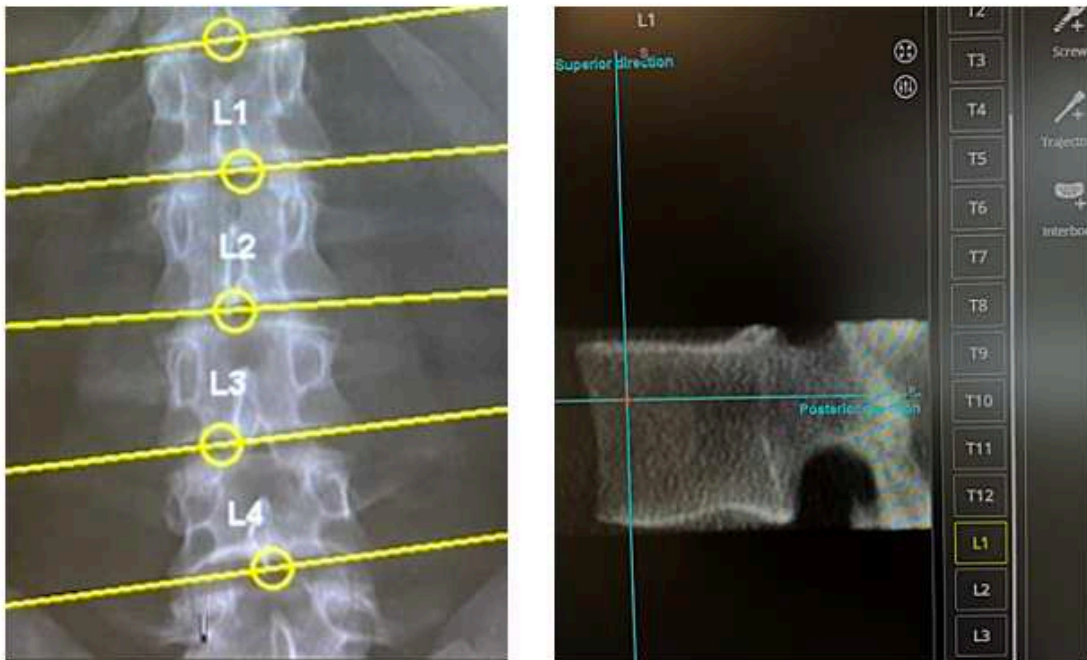


Figure 12 : Segmentation des niveaux vertébraux (à gauche) et visualisation d'une vertèbre individualisée (à droite)

5.3- L'équipe chirurgicale

L'installation du chirurgien et de l'équipe anesthésique dépend comme habituellement du type d'intervention et de la voie d'abord envisagés. Toutefois, leur installation sera fortement influencée par les dimensions, l'agencement de la salle opératoire et les ressources matérielles inhérentes à la réalisation de l'intervention tels l'amplificateur de brillance ou la tomographie intraopératoire, occupant souvent un large espace. Par ailleurs, l'opérateur se positionnera de préférence du côté du patient où le bras robotique effectue la tâche qui lui a été allouée afin de travailler dans le même axe. Le schéma suivant (figure 13) illustre un exemple d'installation au sein du bloc opératoire de neurochirurgie.

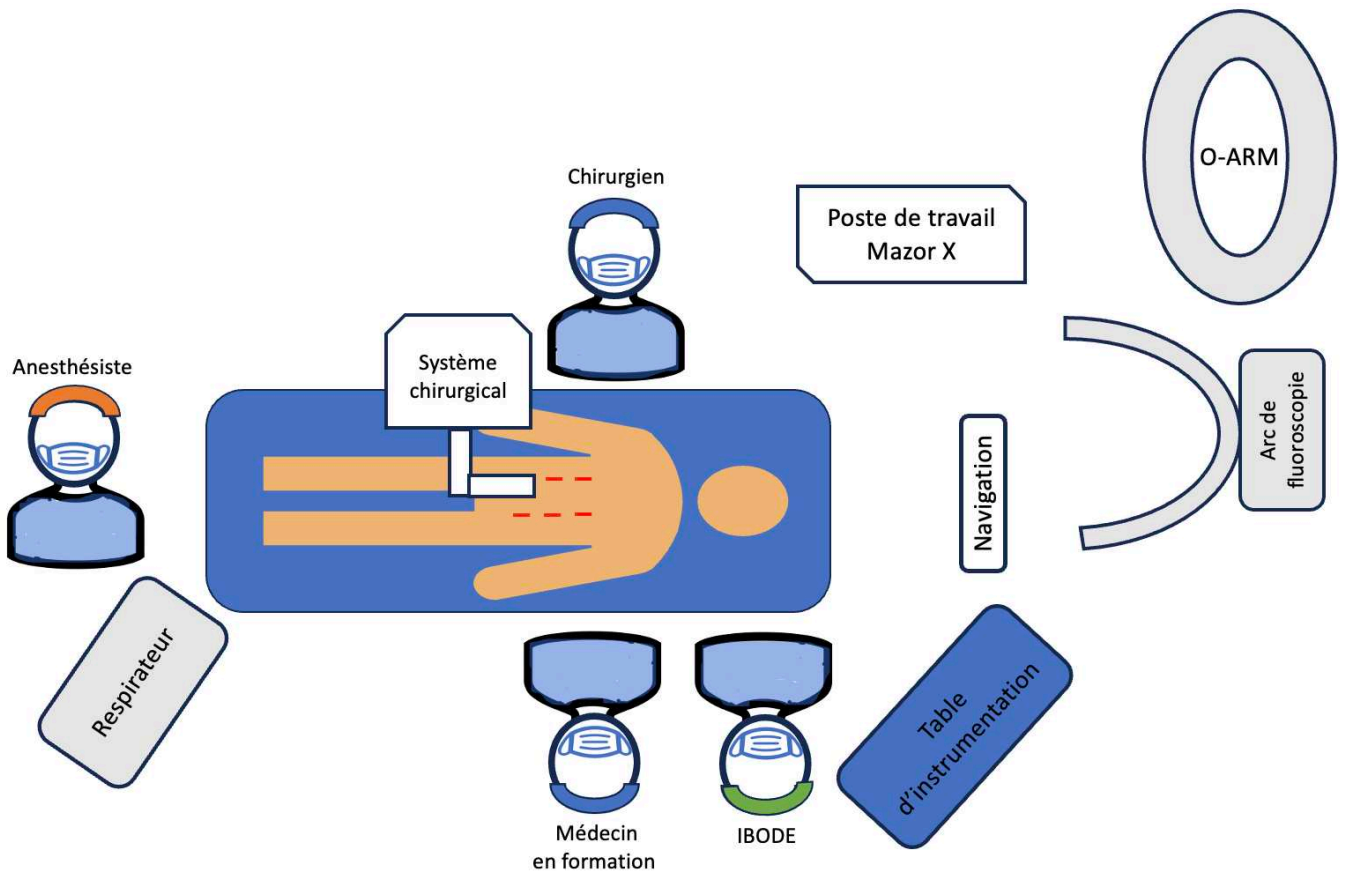


Figure 13 : schéma d'un exemple d'installation au bloc opératoire durant une chirurgie du rachis robot-assistée

Beige : patient
 Ligne rouge : cicatrice
 OARM : tomographie intraopératoire

6- Abords chirurgicaux et insertion des implants

Le système Mazor X permet la réalisation de divers abords chirurgicaux, qu'ils soient percutanés (également appelés « minimalement invasifs ») ou plus conventionnels en « ouvert ».

6.1- Percutané

L'abord percutané est une méthode d'accès à une zone d'intérêt chirurgicale ou médicale par la réalisation d'une incision minimaliste permettant l'effectuer une intervention en étant le moins invasif possible. Elle permet une réduction des douleurs postopératoires, du risque infectieux, du temps de récupération et de la durée d'hospitalisation [26–29]. Un de ses principaux enjeux en chirurgie du rachis robot-assistée réside dans le placement des cicatrices qui doit être anticipé dès la planification à l'aide de l'outil de planification de cicatrice. Cela permet de s'assurer qu'elles soient le plus anatomiques et esthétiques possibles et ainsi éviter les difficultés de cicatrisation. Dans certains cas, une cicatrice légèrement plus longue du plan cutané de niveaux vertébraux adjacents peut être réalisée suivie d'incisions de dimensions plus limitées de l'aponévrose pour introduire les instruments.

Par ailleurs, une attention particulière est à porter aux vis en lombaire bas où il existe un risque de collision avec la crête iliaque selon l'angulation des trajectoires.

6.2- A ciel ouvert

La chirurgie à ciel ouvert nécessite une large exposition. En effet, les tissus mous doivent être correctement rétractés pour réduire les forces de contrainte qu'ils exercent sur le bras robotisé, exposant à un risque de décalage. Une alternative à l'exposition large des tissus mous consiste en une insertion des implants par un abord trans-musculaire.

Dans certaines indications, des abords hybrides associant vissages percutanés et décompression ouverte peuvent être réalisés.

6.3- Insertion des implants

L'enregistrement approuvé, l'écran « Opération » s'affiche et permet l'exécution de la planification chirurgicale. Dans un premier temps, il est nécessaire de préciser au logiciel s'il sera fait usage ou non des éléments d'extension ou « extenders » des vis lors de la procédure (figure 14). Le bras du robot se déplace en respectant une zone de sécurité autour de chaque

vis selon qu'elles soient définies en instruments longs, avec élément d'extension, ou courts, sans éléments d'extension.

La qualité de la navigation doit être régulièrement vérifiée en se référant au point de contrôle de précision du bras chirurgical et aux repères anatomiques pour s'assurer de l'absence de déviation. Le cas échéant, un instantané ou un enregistrement doit à nouveau être effectué.



Figure 14 : éléments d'extension des vis ou « extenders » (flèches vertes)

L'écran « Opération » est scindé en une partie « Affichage » et une partie « Panneau de configuration » (figure 15). La partie « Affichage » permet de visualiser une représentation des instruments chirurgicaux navigués utilisés, leur localisation au sein du corps vertébral sélectionné ainsi que leur alignement avec la planification préopératoire, en temps réel. Cette partie de l'écran permet également la visualisation des implants (vis, cages) utilisés lors de l'intervention aux dimensions présélectionnées. Plusieurs vues sont possibles telles la vue des trajectoires, du bras chirurgical ou fluoroscopie en direct. La partie « Panneau de configuration » met à disposition des outils de paramétrage.

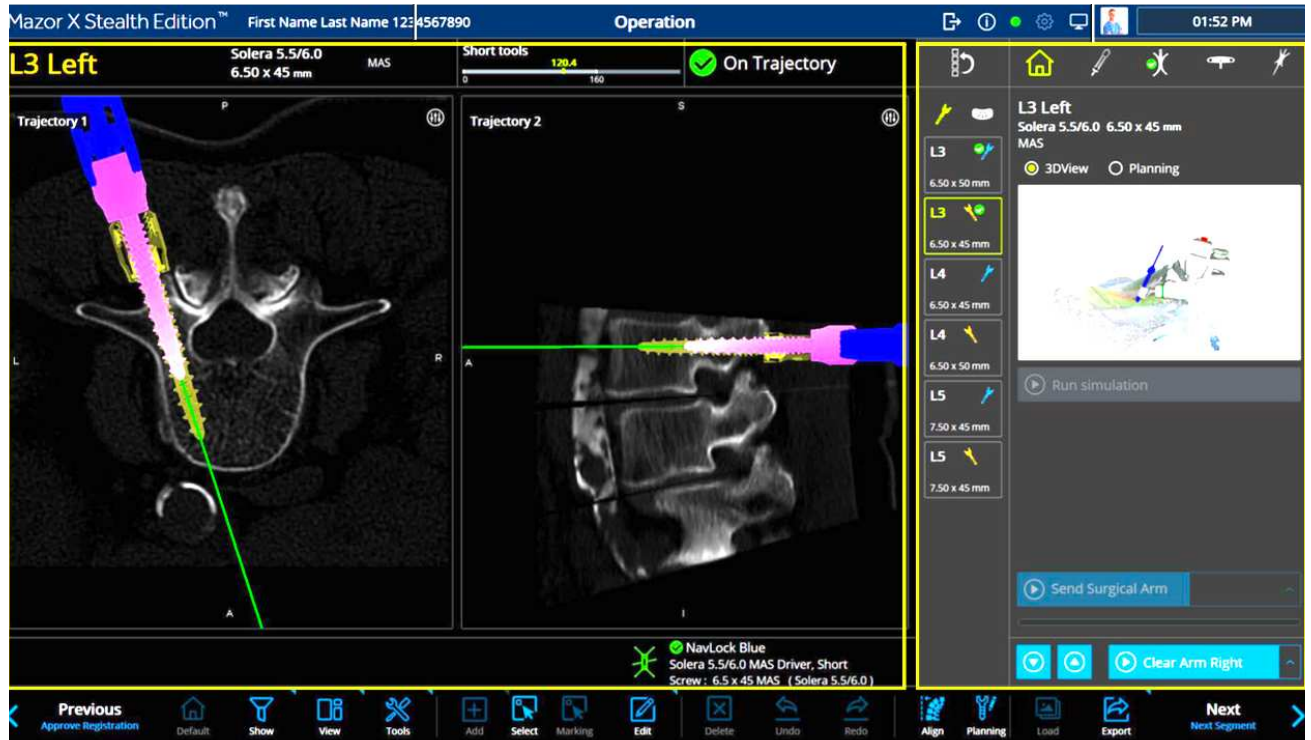


Figure 15 : écran « Opération » scindée en partie « Affichage » (gauche) et « Panneau de configuration » (droite)

L'opérateur détermine l'ordre dans lequel il souhaite exécuter la planification chirurgicale. Par exemple, débiter la pose de vis à partir du niveau crânial ou caudal ou encore, de la gauche ou de la droite de la zone d'intérêt. La vis qui fera l'objet d'une pose est sélectionnée dans le logiciel puis le chirurgien appui sur le bouton « Envoyer le bras chirurgical ». Cela aboutit au déplacement du bras chirurgical sur la trajectoire sélectionnée, dans une conformation prédéfinie. Au cours de tout déplacement du bras chirurgical, il est impératif de vérifier qu'il n'entrera pas en conflit avec d'autres éléments. Si nécessaire, un bouton d'arrêt d'urgence permet l'arrêt du bras chirurgical.

La qualité de la navigation peut à nouveau être contrôlée. En cas de conformité de la navigation, le chirurgien procède à la pose des implants pédiculaires. Pour ce faire, il insère un dilateur dans l'élément de guidage du bras robotisé jusqu'au contact de l'os puis palpe la surface osseuse. Le forage est effectué à l'aide d'un foret motorisé enclenché à pleine vitesse (75000 tours/min). Ensuite, le chirurgien introduit un taraud motorisé et enfin insère la vis. Un indicateur visuel apparaît une fois que l'implant atteint la limite de profondeur planifiée. L'ensemble de ces étapes s'effectue sous contrôle en temps réel et est illustré par les figures 16 et 17. La vis suivante est sélectionnée et les étapes sont répétées jusqu'à la pose de l'intégralité des implants planifiés et souhaités.

Par ailleurs, la planification chirurgicale peut être modifiée en peropératoire. Cela permet par exemple de réajuster une trajectoire planifiée au préalable ou créer ou supprimer une nouvelle.



Figure 16 : étapes préalables à la pose d'une vis pédiculaire au cours d'une chirurgie robot-assistée du rachis

1 : incision cutanée à l'aide du bistouri introduit dans l'élément de guidage du bras robotisé ; 2 : introduction du dilateur jusqu'au contact osseux ; 3,4 : palpation de l'os avec contrôle en temps réel sur l'écran ; 5 : forage à l'aide du foret motorisé ; 6 : introduction du taraud motorisé

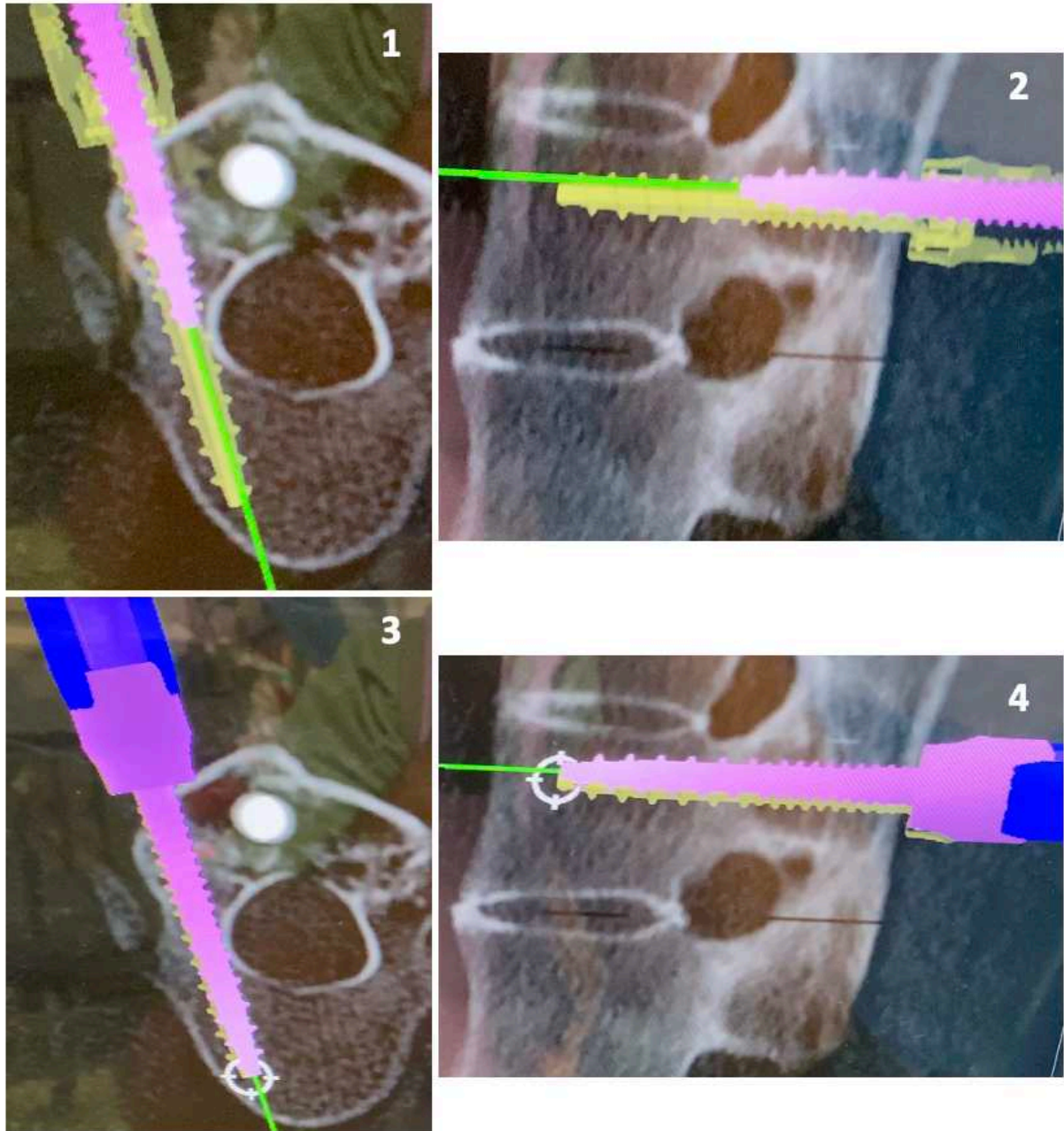


Figure 17 : insertion de la vis pédiculaire sous contrôle en temps réel

1, 2 : vis pédiculaire en cours d'introduction visualisée sur en incidences axiale et sagittale sur l'écran du poste de travail ; 3,4 : vis pédiculaire totalement insérée avec présence d'un marqueur à l'extrémité distale de l'implant (rond blanc) indiquant à l'opérateur que la trajectoire planifiée est atteinte.

7- Possibilités du guidage robotisé

Le guidage robotisé permet d'optimiser le placement de divers types d'implants et d'effectuer des résections osseuses en condition stéréotaxique.

7.1- Vis pédiculaires

L'insertion de vis pédiculaires par assistance robotique permet d'assurer une reproductibilité de la pose du matériel selon une trajectoire prédéfinie. Il est maintenant possible de planifier et d'exécuter une insertion pédiculaire en temps réel selon une trajectoire sécurisée permettant une meilleure tenue osseuse. La robotique permet aussi de limiter le risque de syndrome adjacent en planifiant une trajectoire qui épargne les articulaires postérieures des vertèbres.

7.2- Dispositifs intersomatiques

La pose de dispositifs intersomatiques telles les cages intersomatiques et les prothèses discales peut également s'effectuer en condition robot-assistée (figure 18). Le positionnement de ces implants peut avoir un impact significatif sur la stabilité posturale du patient. Une planification adaptée et un gain de précision de leur insertion participent à l'amélioration des résultats postopératoires. L'algorithme de segmentation par niveau permet de conserver un degré de précision élevé malgré les manœuvres de distraction ou l'introduction de tels dispositifs intersomatiques.

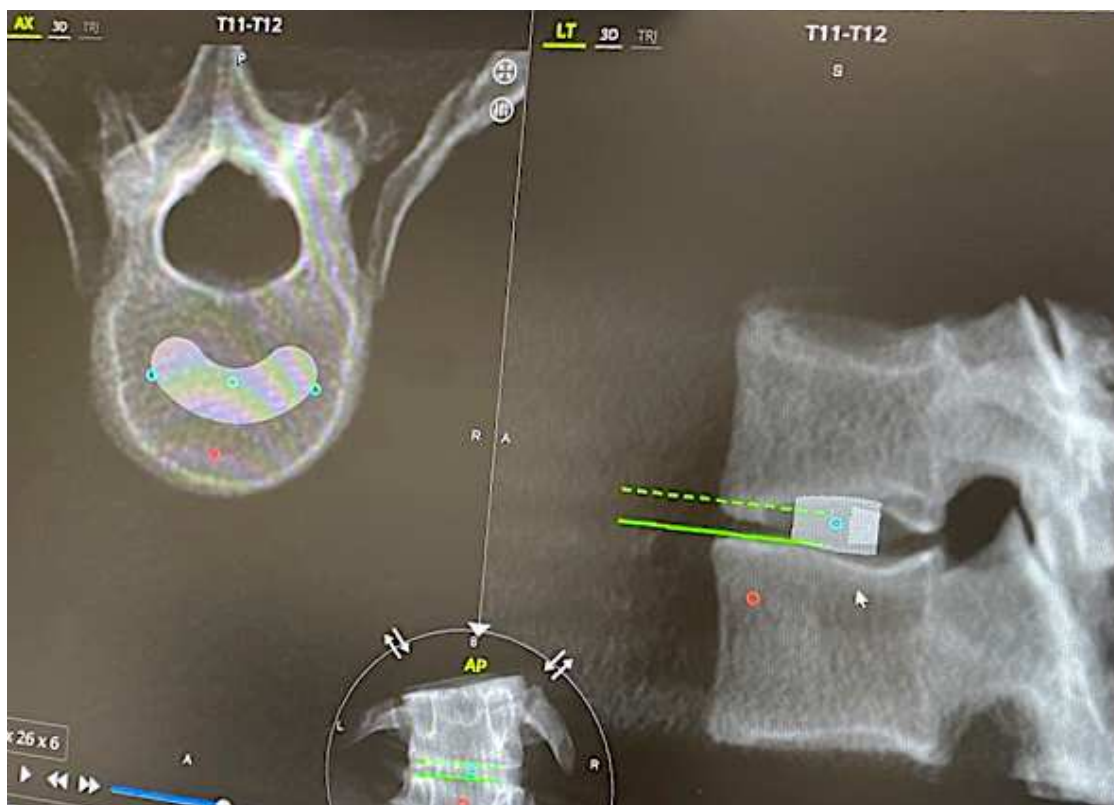


Figure 18 : exemple de planification de pose de cage intersomatique

7.3- Résection osseuse

L'assistance de systèmes robotisés en chirurgie du rachis permet la résection de tumeurs osseuses rachidiennes en définissant des lignes de coupe. Celles-ci permettent de réaliser une résection sur mesure en limitant les risques de déstabilisation rachidienne. L'intérêt de cette technologie réside également dans la réalisation d'ostéotomies complexes en chirurgie de correction de déformation avec précision en prenant mieux en compte les typicités anatomiques de chaque patient.

8- Expérience lilloise

Sur une période s'étendant du 10 novembre 2022 au 24 mai 2023, 35 indications de chirurgie du rachis assistée par robot ont été retenues au CHU de Lille. Parmi ces patients, 2 patients n'ont pas été opérés à l'aide du robot en raison de difficultés techniques ou organisationnelles et 1 patiente a fait l'objet d'une chirurgie hors label (cf. 8.2, cas 3 : déformation). Une chirurgie robot-assistée selon les labels de l'industriel a été effectuée chez 32 patients. Les données sont présentées dans le diagramme de flux (figure 19). Nous proposons une analyse descriptive des 32 cas et une illustration de quelques cas.

L'analyse statistique a été effectuée avec le logiciel R (v 4.3.1.) et les régressions linéaires avec Excel (v 2307). Les variables qualitatives, binaires, ou discrètes avec très peu de modalités sont exprimées en effectif et pourcentage. Les variables quantitatives sont exprimées en moyenne et écart type (*SD*, *standard deviation*) si l'histogramme révèle une distribution d'allure symétrique, et médiane premier et troisième quartile (*Q1*, *Q3*) dans le cas contraire. En cas d'analyse bivariée, l'indépendance entre une variable qualitative et une variable quantitative est testée à l'aide d'un test de Student si les critères de validité étaient présents, sinon un test de Welsh a été réalisé. Les tests statistiques sont bilatéraux. Les *p value* sont considérés comme significatifs au seuil de 5 %. Les intervalles de confiance sont calculés à 95 %.

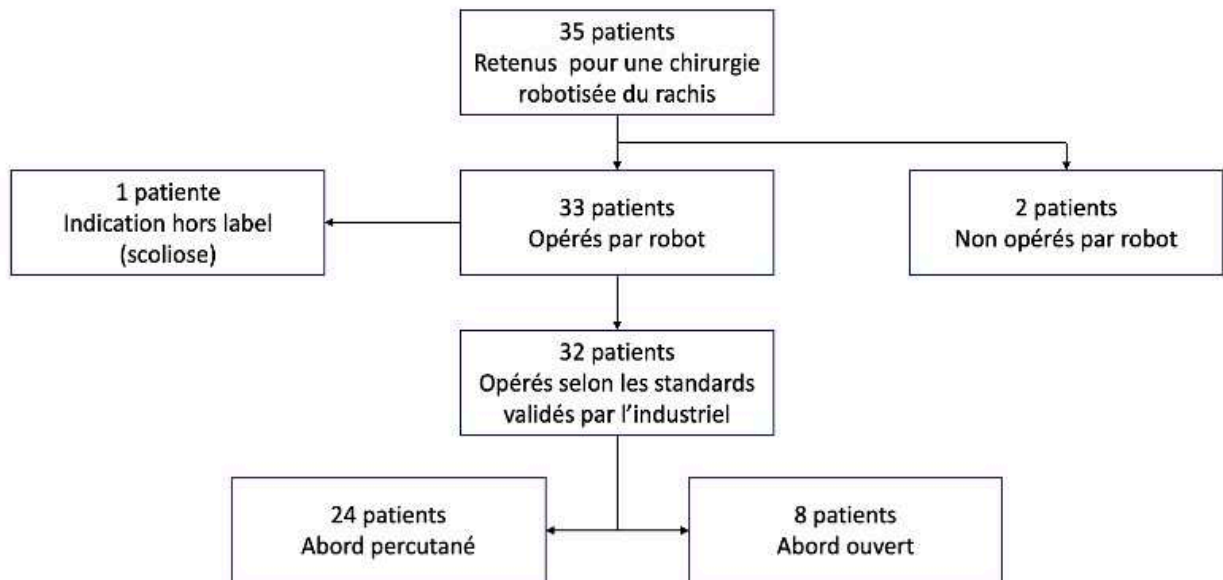


Figure 19 : Diagramme de flux

8.1- Démographie

Dans cette rubrique, nous détaillerons les caractéristiques des patients de notre série que sont le sexe ratio, l'âge, le score ASA (cf. annexes), les indications, le nombre de niveaux opérés et le nombre de vis.

Notre série se compose de 14 femmes et de 18 hommes d'une moyenne d'âge de 58,18 ans (SD 15.06 [19 ; 87]). L'IMC est moyen est de 28 kg/m² (SD 5,31 [17,5 ; 42,5]). Tous les patients ont un score ASA ≤ 3. Le tableau 1 présente la proportion des patients selon le score ASA (cf. annexe 1).

Score ASA	Patients (nombre)	Patients (%)
1	8	25
2	20	62,5
3	4	12,5
Total	32	100

Tableau 1 : répartition des patients selon le score ASA

Les indications se répartissent comme suit : 63 % dégénératif (n=20), 25 % tumoral (n=8), 6 % déformation (n=2) et 6 % traumatique (n=2). La figure 20 présente la répartition des indications chirurgicales. Dans 75 % des cas, il s'agissait d'un abord percutané (n=24). La médiane de niveaux vertébraux opérés, présentée dans la figure 21, est de 3 [2 ;7]. Au total, 202 vis ont été posées.

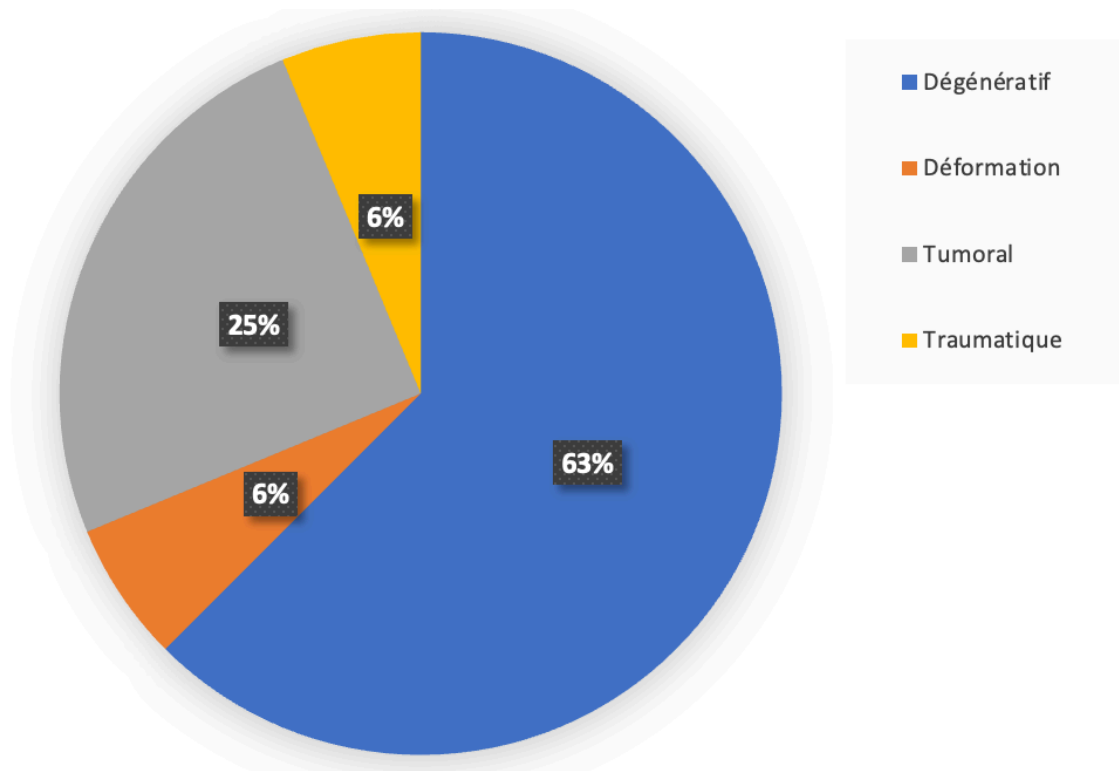


Figure 20 : diagramme de répartition des indications chirurgicales

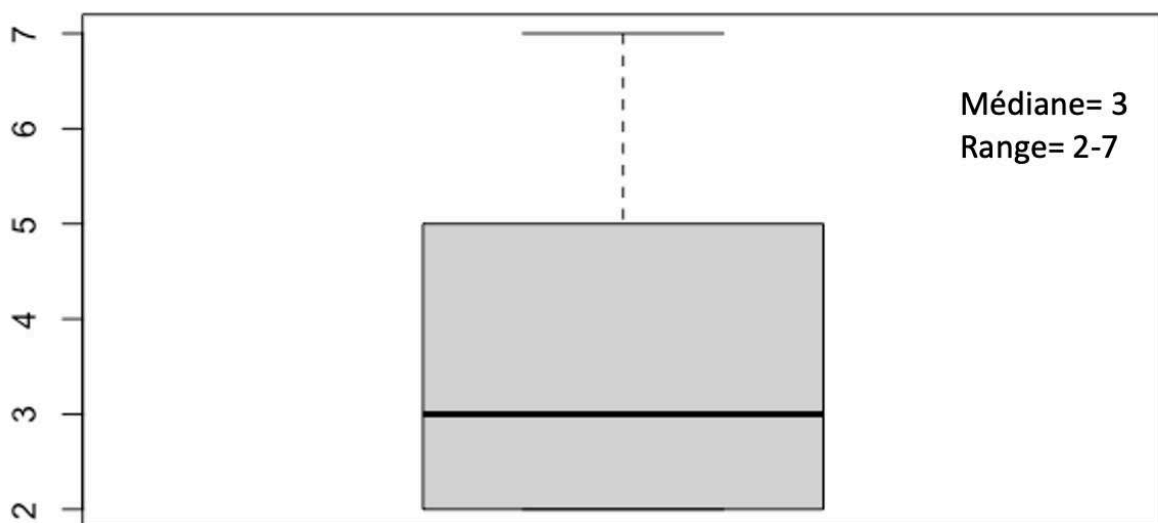


Figure 21 : nombre de niveaux vertébraux opérés

8.2- Indications chirurgicales : série de cas

Nous proposons d'illustrer ici quelques cas de patients opérés à l'aide du robot.

Cas 1 : dégénératif

Femme, 60 ans, présente des lombalgies basses chroniques et des radiculalgies L5 gauches. Le bilan d'imagerie retrouve une discopathie dégénérative L4L5 associée à un spondylolisthésis de grade 1 (figure 22). En dépit d'une prise en charge rééducative bien conduite, la patiente demeure invalidée. Le score sur l'échelle d'incapacité d'Oswestry est à 84 (cf. annexe 2). Une indication d'arthrodèse lombaire de type T-LIF mini-invasif est retenue.

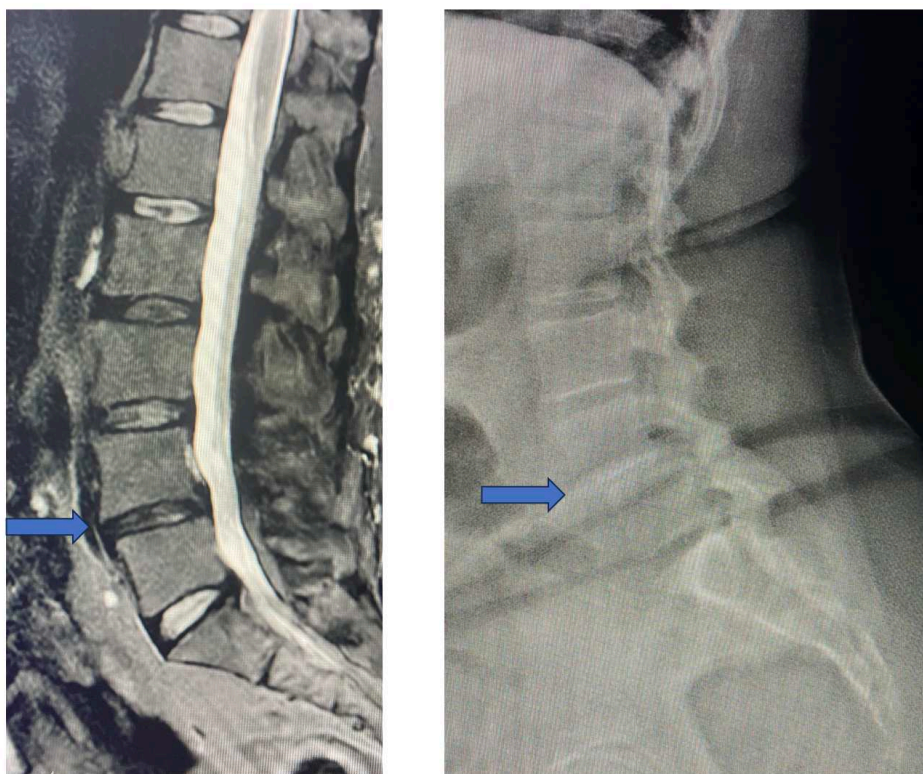


Figure 22 : discopathie dégénérative L4L5 avec spondylolisthésis

Droite : discopathie L4L5 avec discret spondylolisthésis (flèche), IRM, séquence T2, coupe sagittale ; gauche : discopathie L4L5 avec majoration du spondylolisthésis (flèche)

Les étapes du T-LIF mini-invasif robotisé sont illustrées par la figure 23. L'évolution clinique en postopératoire immédiat est favorable. La patiente rentre à domicile à J4 postopératoires.

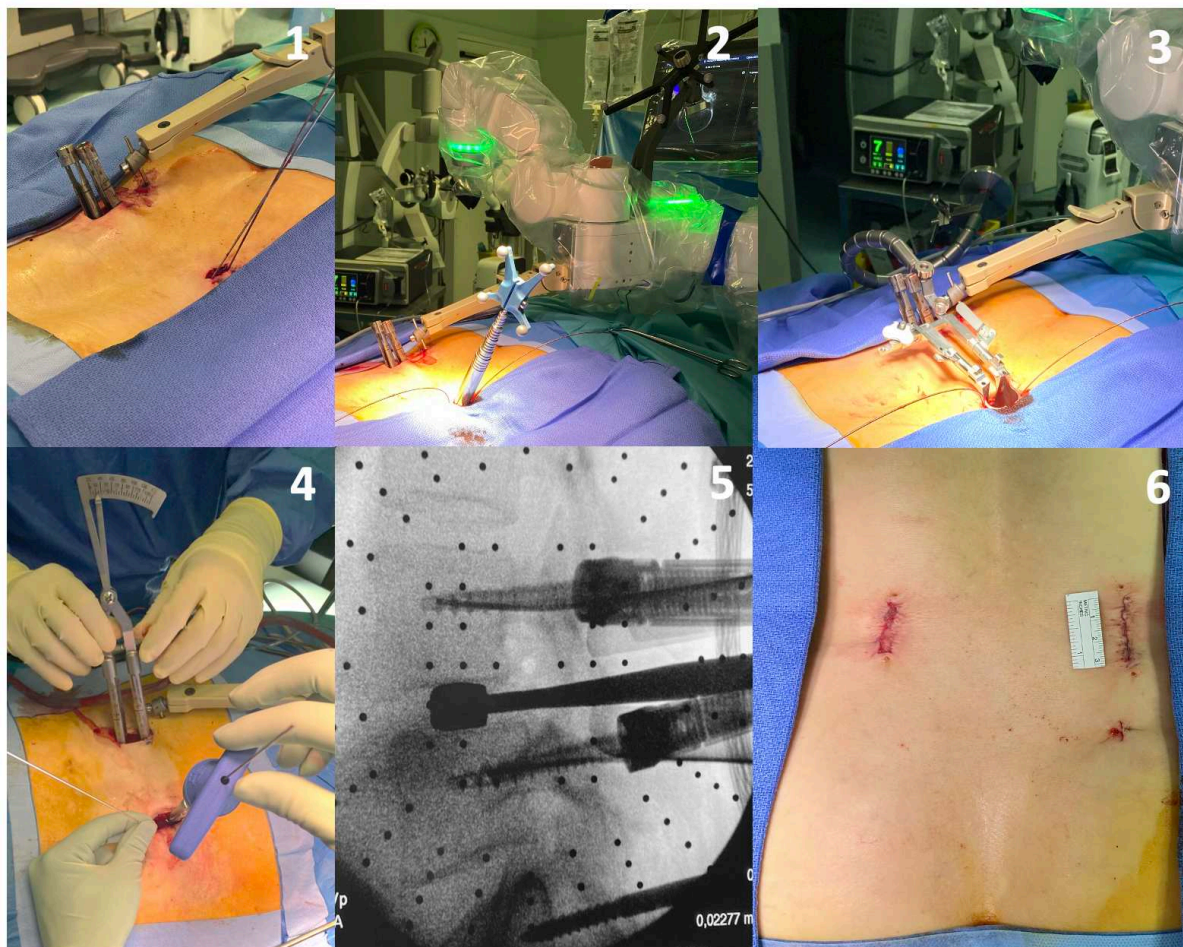


Figure 23 : étapes du T-LIF mini-invasif robotisé

1 : vis L4L5 droites et broches L4L5 posées ; 2 : navigation tubulaire du coté des broches ; 3 : mise en place de l'écarteur pour l'arthrectomie et la discectomie ; 4, 5 : insertion de la cage intersomatique ; 6 : cicatrices (environ 3cm).

Cas 2 : tumoral

Homme, 19 ans, sans antécédent médico-chirurgical. Découverte en 2022 dans un contexte de syndrome rachidien dorsal bas, d'une tumeur myofibroblastique inflammatoire paravertébrale droite initialement inopérable avec un envahissement de l'aorte mais également de la vertèbre T12 d'aspect ostéolytique, en présence de localisations pleurales. Devant une bonne réponse au traitement par CRIZOTINIB (figure 24) et une artériographie mettant en évidence une artère d'Adamkiewicz naissant de T12 gauche, il est retenu une indication à une exérèse monobloc en 2 temps. Le premier temps, neurochirurgical, consiste en une hémicorporectomie droite de T12 et ostéosynthèse T11-L1 (figures 25 et 26) ; le second, effectué par l'équipe de chirurgie thoracique, en une exérèse de la masse avec pleurectomie et résection diaphragmatique partielle.

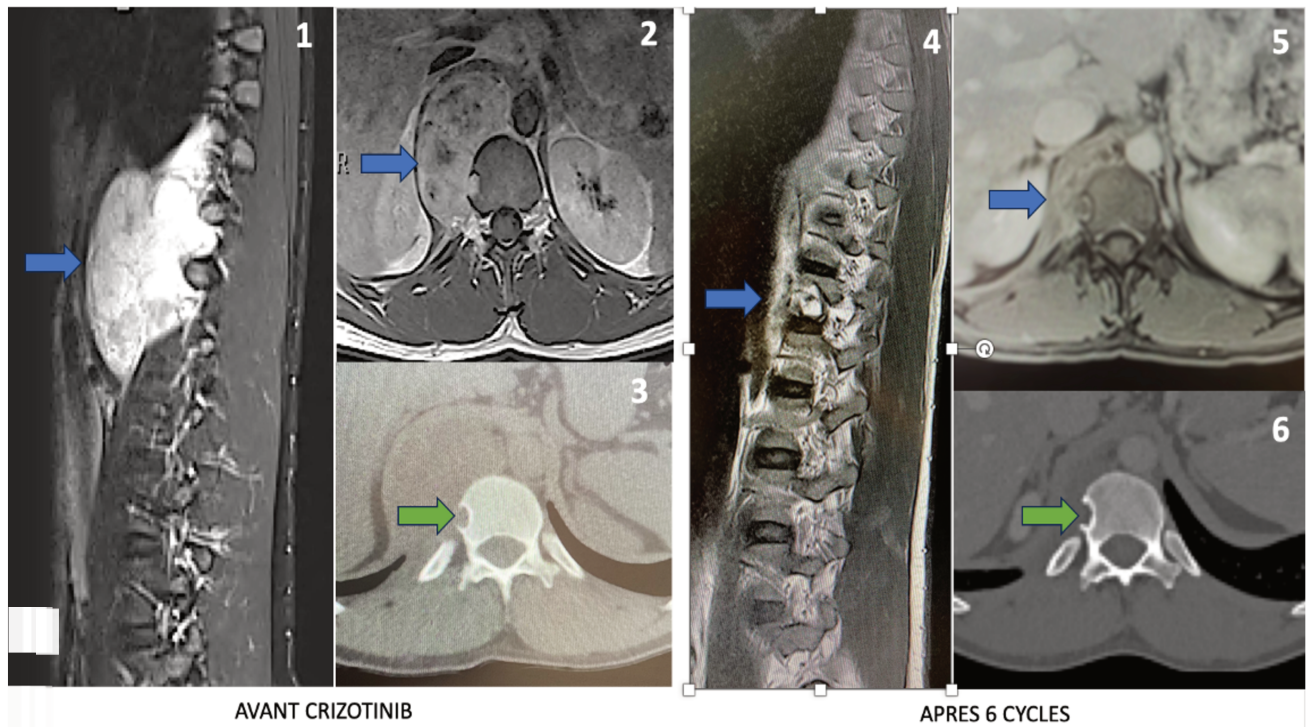


Figure 24 : réponse tumorale avec le CRIZOTINIB

1, 2 : tumeur avant CRIZOTINIB (flèches bleues), IRM séquence T1-GADO, coupe sagittale et axiale ; 3 : lacune ostéolytique en T12 (flèche verte), scanner, fenêtre osseuse, coupe axiale ; 4,5 : réduction tumorale après 6 cycles de CRIZOTINIB (flèches bleues), IRM séquence T1-GADO, coupe sagittale et axiale ; 6 : lacune ostéolytique en T12, scanner (flèche verte), fenêtre osseuse, coupe axiale

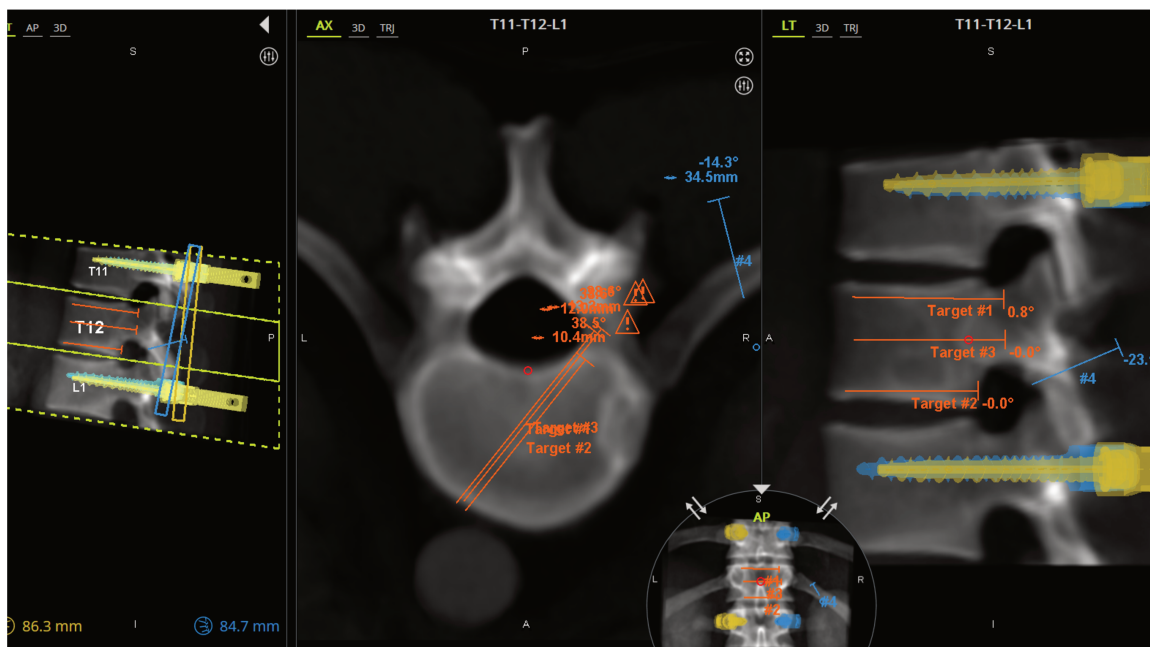


Figure 25 : planification de l'ostéosynthèse et de la résection osseuse (lignes de coupe en rouge)

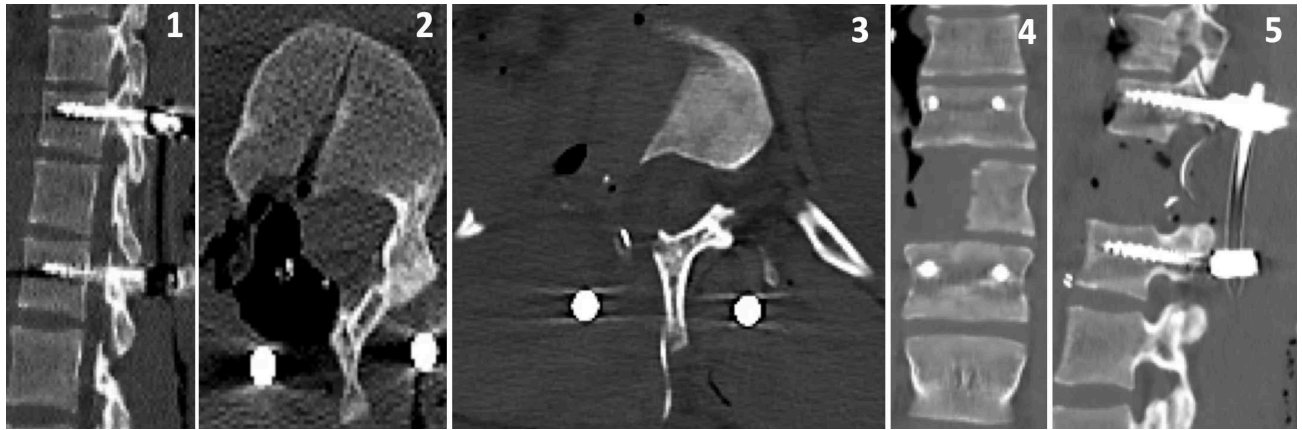


Figure 26 : exécution de la planification chirurgicale

1 : ostéosynthèse T11-L1, scanner, coupe axiale ; 2 : début de résection osseuse de T12, scanner, coupe axiale ; 3 : hémicorporectomie droite de T12, scanner, coupe axiale ; 4,5 : ostéosynthèse T11-L1 et corporectomie droite de T12, scanner, coupes coronale et sagittale.

L'évolution est satisfaisante et le patient regagne son domicile à J8 postopératoires. A 2 mois, le patient présente une dysesthésie du flanc droit sans retentissement sur sa qualité de vie et n'a pas de plainte particulière.

Cas 3 : déformation

Femme, 19 ans, présentant une scoliose idiopathique (figure 27) d'aggravation progressive avec un angle de Cobb passant de 27° en 2020 à 47°.



Figure 27 : radiographies EOS per-opératoires de profil, de face et en inclinaison

Elle se plaint de dorsalgies hautes invalidantes et se dit gênée sur le plan esthétique. Il est retenu une indication à une chirurgie d'alignement par arthrodèse étendue de T2 à L2. La planification préopératoire et les radiographies de contrôle postopératoires sont illustrées par les figures 28 et 29.

L'intervention est effectuée à ciel ouvert sans complication particulière. Une transfusion d'un culot globulaire est effectuée. Il n'y a pas eu de complications postopératoires précoces. La patiente rapporte une amélioration des paresthésies du membre inférieur gauche. Elle est transférée en rééducation.

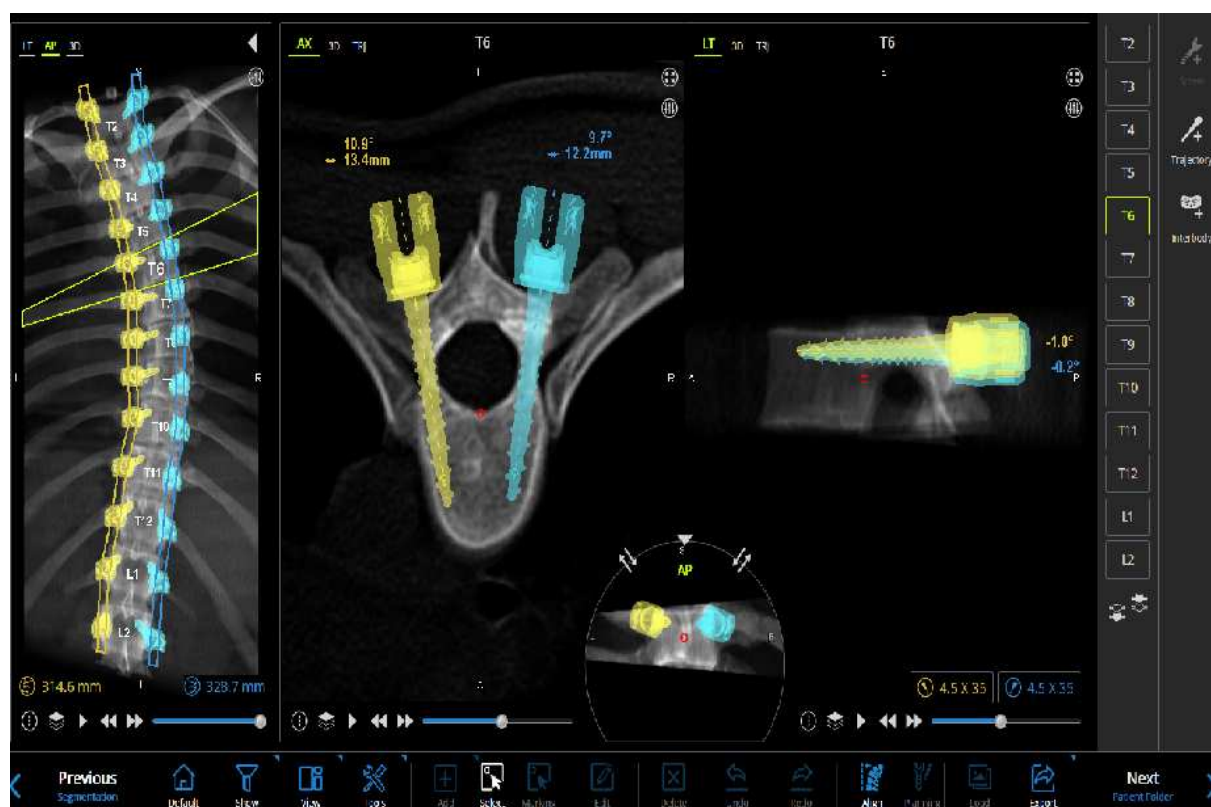


Figure 28 : planification préopératoire de la scoliose robot-assistée

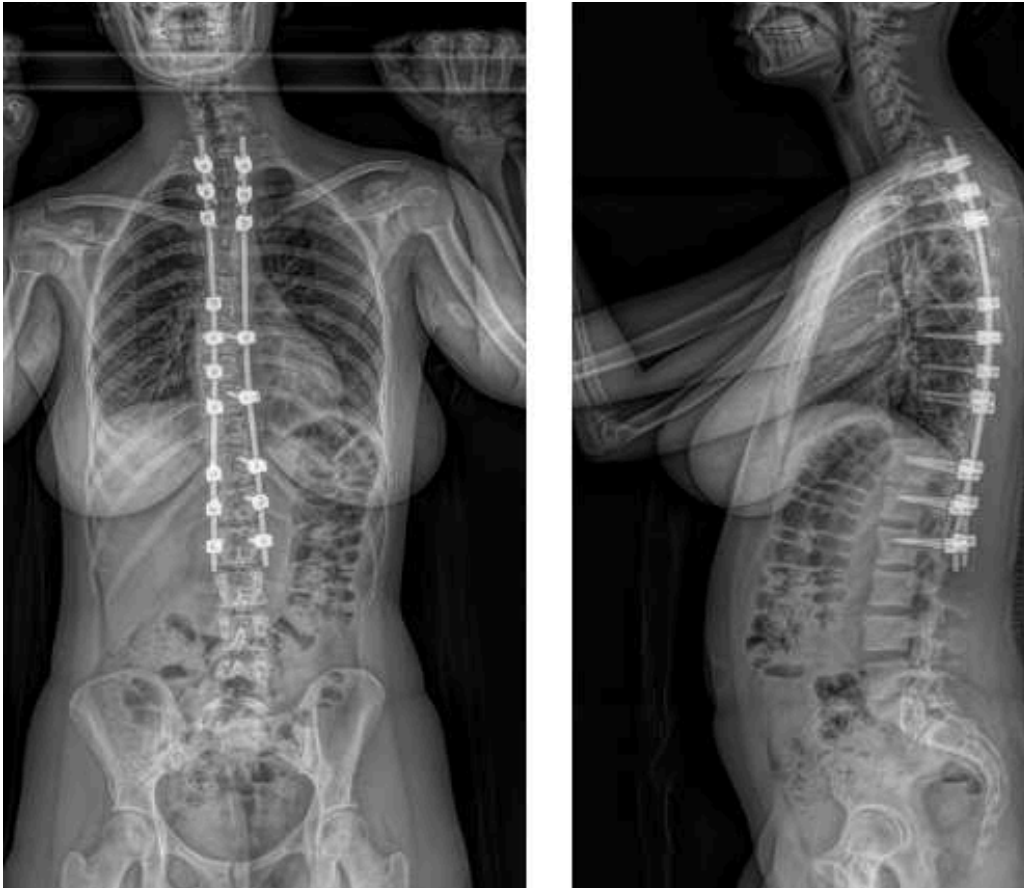


Figure 29 : radiographies EOS postopératoires de face et de profil

8.3- Évolution des durées opératoires

La moyenne de durée totale d'intervention est 331,1 min (SD 102,4 [158 ; 540]), la durée moyenne d'installation est 94,9 min (SD 23,3 [57 ; 150]) et la durée opératoire est 186.7 min (SD 89,7 [45 ; 386]). La figure 30 présente les durées opératoires.

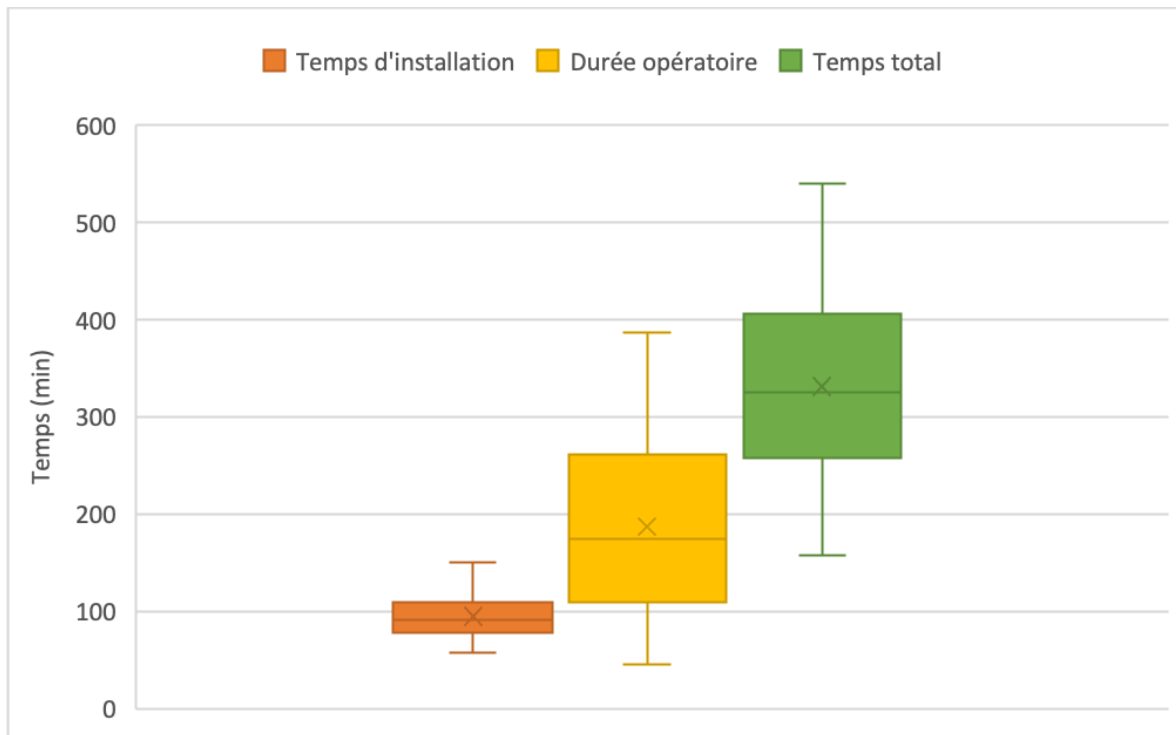


Figure 30 : Durées opératoires

Afin de mettre en évidence une évolution de la pratique en fonction des du nombre de patients opérés dans le temps pré suppose d'avoir une population de patient relativement homogène. Le temps opératoire peut être fortement impacté par une la réalisation de geste complémentaire comme une décompression en plus de la fixation rachidienne. De plus, les opérateurs ont été différents et ont utilisé le robot avec une fréquence variable. Parmi les 32 patients de notre série, 10 patients ont fait l'objet d'un geste de décompression et/ou n'ont pas été opérés par les opérateurs les plus fréquents.

La sous-population créée comporte 22 patients. Les graphiques suivants présentent les analyses de régression linéaire effectuées (figures 31 et 32). Les patients sont rangés du premier au dernier opéré sur la période d'inclusion.

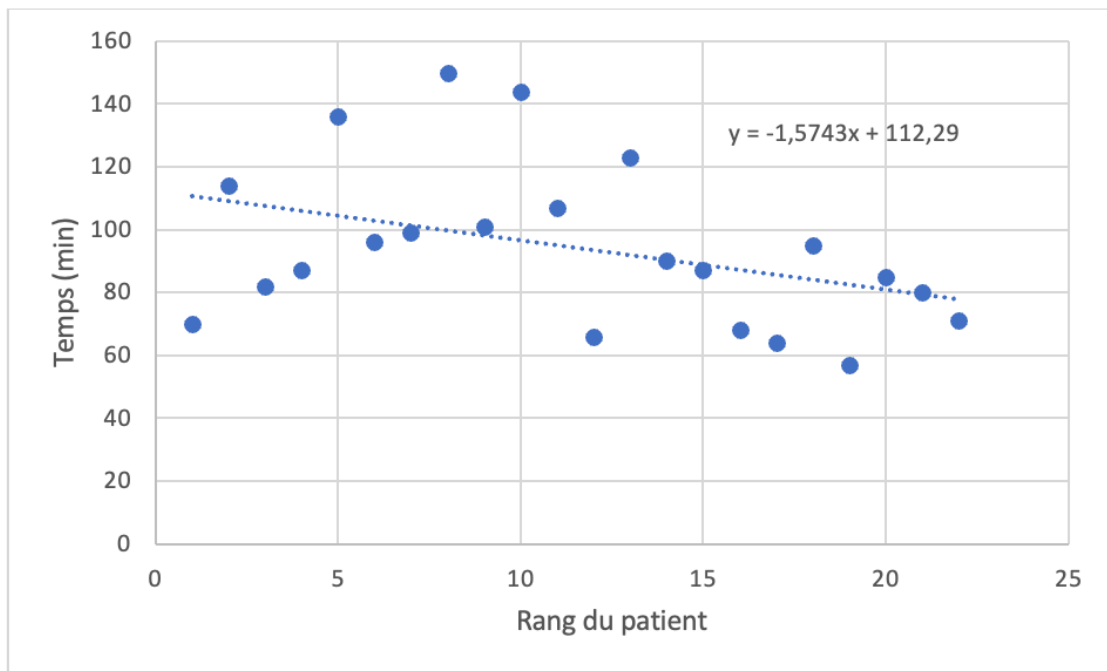
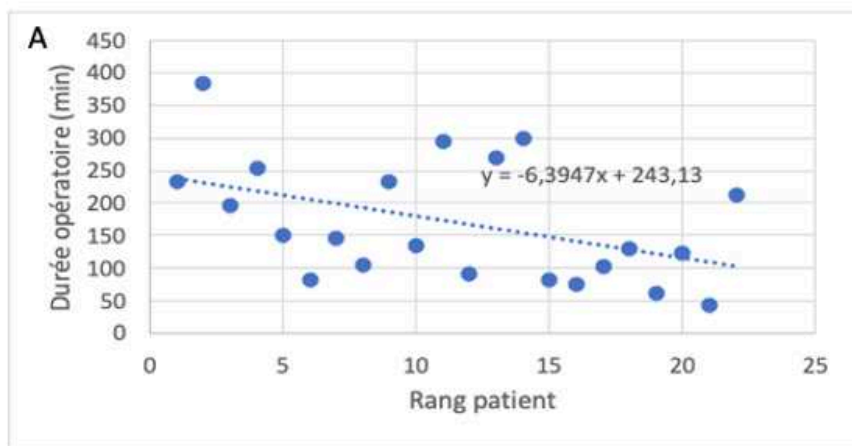
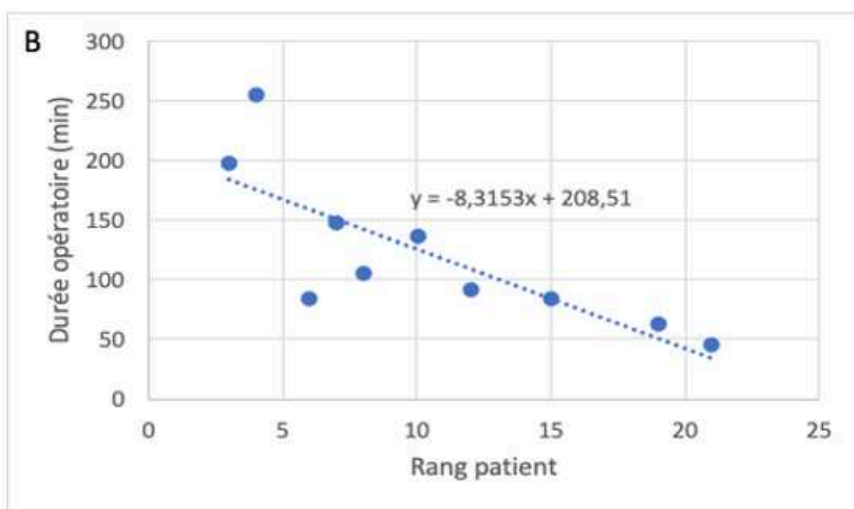


Figure 31 : régression linéaire entre la durée d’installation et le rang des patients dans le temps

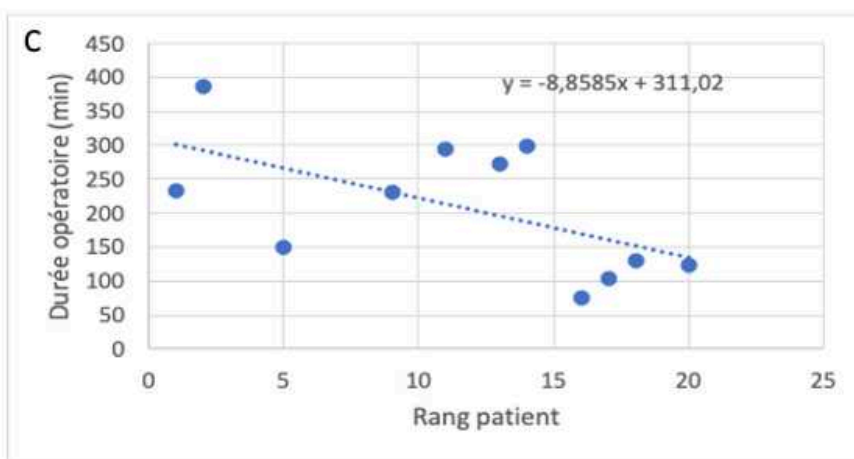
Coefficient de Pearson à -0,39 (mesure statistique définissant la force de la relation entre 2 variables et leur association l'une et l'autre)



Régression linéaire entre la durée opératoire et le rang des patients



Régression linéaire entre la durée opératoire et le rang des patients opérés de moins de 4 niveaux



Régression linéaire entre la durée opératoire et le rang des patients opérés de plus de 3 niveaux

Durée opératoire		
	Nombre de patients	Coefficient de Pearson
Patients < 4 niveaux	11	-0,79
Patients > 3 niveaux	11	-0,58
Tous les patients	22	-0,45

Figure 32 : régressions linéaires de la durée opératoire dans le temps (sous-population)

D'une façon globale, il semble exister une tendance à la baisse des durées opératoires dans le temps en fonction du nombre de cas opérés.

Le nombre de cas effectué ne semble pas corrélé à une diminution du temps d'installation (coefficient = -0,39, figure 31) de même que la durée opératoire en fonction des cas réalisés de façon globale (coefficient de Pearson= -0,45, figure 32-A).

En revanche, la durée opératoire semble davantage diminuer à mesure es cas opérés chez les patients opérés de plus de 3 niveaux (coefficient= -0,58, figure 32-C) et de façon plus franche chez ceux opérés de moins de 4 niveaux (coefficient= -0,79, figure 32-B).

9- Discussion, limites et perspectives

9.1- Discussion

L'arrivée du robot au bloc opératoire représente une rupture technologique. Désormais, la pose des vis n'est plus le principal challenge. Le temps de pose par vis d'une durée de 2 à 4 min apparaît incompressible et la planification préopératoire occupe une place prépondérante. Le chirurgien se recentre davantage sur l'analyse des particularités du patient pour élaborer une planification personnalisée.

Pour exploiter le potentiel de cette technologie et garantir les meilleurs résultats postopératoires, une formation dédiée du personnel est nécessaire. La formation revêt un volet théorique et un volet pratique liés à la connaissance et à la maîtrise du logiciel de planification, des étapes d'installation, de mise en fonction et d'utilisation du système chirurgical. Elle comprend aussi une simulation de la première intervention chirurgicale et d'interventions potentiellement complexes afin de coordonner les membres de l'équipe, repérer les éventuels points à améliorer et ainsi parfaire la formation des professionnels. De plus, dans le cadre d'un centre universitaire où évoluent des seniors et des juniors en cours de formation, l'évaluation de la courbe d'apprentissage d'une telle technologie apparaît indispensable. En effet, le degré d'autonomie octroyé à l'opérateur dépend de sa connaissance du bon usage de la technologie mais également de son expérience chirurgicale. Il convient de rappeler que les connaissances chirurgicales de base de tout chirurgien sont primordiales et indissociables de l'usage des technologies à sa disposition.

Par ailleurs, témoin d'une France en plein virage technologique, la « Robotique en chirurgie / bloc augmenté » a été érigée en Grand Défi (Ministère de l'Économie, des Finances publiques et de la Souveraineté industrielle et numérique). Cette innovation médicale soutenue requiert différentes compétences et fait émerger de nouvelles collaborations. Ainsi, au bloc opératoire, les ingénieurs du partenaire industriel collaborent étroitement avec l'équipe chirurgicale et contribuent à sa formation. Cette coopération est un point clé de la courbe d'apprentissage à la chirurgie robot-assistée. Nous précisons également que notre équipe inclue un ingénieur dédié au bloc opératoire de neurochirurgie qui, lui aussi formé à l'utilisation du robot, assure la gestion et le bon fonctionnement des diverses technologies.

D'un point de vue pratique, la salle et la table d'intervention doivent être adaptées à l'usage de ces systèmes chirurgicaux. Notre expérience nous a conduit à privilégier une table radio transparente standard qui facilite une mobilisation conjointe du patient et du système chirurgical. L'installation fixe du patient est une étape essentielle à la précision du système chirurgical.

Il semble également pertinent de préciser qu'initialement des interventions de complexité réduite sont à privilégier afin d'en réduire les risques et les temps opératoires. Une intervention chirurgicale maîtrisée au préalable à main levée permet de conserver un regard critique vis-à-vis des trajectoires proposées par le robot. Une vigilance constante doit être maintenue au cours de l'intervention. Deux principaux risques de déviation des trajectoires par rapport à la planification ont été repérés. Il s'agit du « skiving » qui désigne la déviation contre une surface osseuse saillante au moment du fraisage de la trajectoire et, de la force de contrainte exercée par les tissus mous sur le bras robotisé, particulièrement importante chez le patient en surcharge pondérale. Des stratégies permettent de limiter ces risques. En effet, une fois la fraise introduite dans l'outil de guidage, le fait de l'actionner à pleine vitesse (75000 tours/min) pour débiter le fraisage avant d'entrer en contact avec la surface osseuse permet de réduire le risque de « skiving ». Les forces de contraintes exercées par les tissus peuvent être réduites par une exposition large lors d'un abord en ouvert. Une insertion transmusculaire de l'implant est une alternative. D'autres éléments à prendre en compte sont les particularités anatomiques avec l'exemple du rachis thoracique soumis aux mouvements respiratoires et dont la partie proximale est plus mobile. Dans ce cas, les acquisitions peuvent s'effectuer en apnées en cas d'utilisation de la tomographie intraopératoire. Le système robotique utilisé est également compatible avec une navigation classique à fixer sur le patient en complément de sa propre navigation. De plus, en cas de pédicules étroits, le robot offre la possibilité de planifier des trajectoires sécurisées avec une meilleure tenue osseuse.

Dans notre série, les principales indications de chirurgie robot-assistée du rachis sont le rachis dégénératif suivi du rachis tumoral. Les cas réalisés sont variés et s'étendent d'indications standards de type ostéosynthèse ou arthrodeuse rachidienne à des cas d'ostéosynthèse associée à une décompression, une résection osseuse ou encore la réalisation d'une chirurgie de scoliose robot-assistée, indication hors label. Deux cas traumatiques ont été effectués bien que l'indication traumatique puisse paraître contre-intuitive face à l'instabilité rachidienne. Les complications sont marquées par 2 cas d'infection postopératoire. Il n'y a pas eu de complications graves. Nous remarquerons que dans l'intégralité des cas, ce sont des interventions chirurgicales programmées et donc effectuées en heures ouvrables en raison, entre autres, des moyens humains et matériels nécessaires au cours des premières utilisations du robot. Il n'a pas encore été envisagé d'utiliser le robot dans le cadre de l'urgence.

Statistiquement, le faible nombre de cas et la variabilité des opérateurs n'ont pas permis de mettre en évidence de façon significative l'existence statistique d'une courbe d'apprentissage. Toutefois, il existe une tendance globale à la baisse de l'ensemble des durées opératoires fonction du nombre de cas opéré surtout pour la durée opératoire des patients opérés de moins de 4 niveaux. Cela pourrait s'expliquer par la réalisation d'une acquisition pour ces patients alors qu'au-delà une autre acquisition pour travailler sur les niveaux suivants est nécessaire, ce qui permettrait de mieux apprécier la présence d'une courbe d'apprentissage. Dans la littérature, les données sur l'existence d'une courbe d'apprentissage en chirurgie assistée par robot sont variables. Barrie et al, suggèrent que la courbe d'apprentissage se situerait pour la chirurgie laparoscopique assistée par robot en cas de chirurgie de cancer colorectal entre 15 et 30 cas [30]. En chirurgie du rachis assistée par robot, la phase d'apprentissage serait aux alentours de 17 à 18 cas [31]. Kam et al, rapportent une courte voire l'absence de courbe d'apprentissage en comparant la précision, le temps de pose des implants, le taux de complications au début de leur pratique de chirurgie robot-assistée du rachis et à environ 1 an [32]. De notre expérience, la chirurgie robot-assistée du rachis semble répondre à une courbe d'apprentissage courte. La complexité des cas réalisées a été rapidement croissante avec une absence de complications graves, y compris depuis la fin de la collecte des données. Il s'agit toutefois d'une analyse préliminaire et d'autres analyses sont nécessaires afin d'évaluer statistiquement l'impact de la chirurgie robot-assistée sur notre pratique.

9.2- Limites

Les limites de la chirurgie robot-assistée du rachis que nous avons rencontré sont essentiellement de nature technique ou matérielle. La planification requiert un temps dédié et parfois long selon la complexité du cas. Les temps d'installation et de calibration du robot sont aussi chronophages. Le nombre maximal de niveaux exploitable au cours d'une acquisition étant limité à 4 ou 5, une planification sur plus de niveaux nécessite donc plusieurs acquisitions pour les montages longs. Par conséquent, envisager une réduction du temps opératoire doit passer par l'optimisation de ces facteurs ; le temps de pose de vis paraissant incompressible. Par ailleurs, dans les cas d'importante déformation anatomique, les trajectoires proposées peuvent être difficilement voire non réalisables en per opératoire soulignant l'importance de l'étape de planification préopératoire et des outils d'aide à la planification telle la modélisation de la projection des cicatrices en superficie. Les clichés fluoroscopiques en cas d'ostéoporose et d'obésité peuvent s'avérer inexploitable par le logiciel. Dans ces situations, la tomographie intraopératoire est une solution. De plus, le coût du système chirurgical robotisé ainsi que la nécessité de moyens humains (ingénieurs) et matériels (salle de bloc ergonomique, kit à usage unique avec code d'activation, ...) à son utilisation peuvent ralentir sa démocratisation.

9.3- Perspectives

La chirurgie du rachis robot-assistée est amenée à évoluer et fait émerger de nouvelles perspectives. Cette technologie participe à la banalisation de l'étape de pose des vis et permet au chirurgien de se consacrer à d'autres étapes de l'intervention chirurgicale tels les gestes de correction ou de greffe qui auparavant, pouvaient être effectuées par un opérateur déjà éprouvé par la mise en place complexe des implants. Le franchissement d'une nouvelle phase serait l'automatisation de certaines tâches chirurgicales sous la supervision du chirurgien aboutissant par exemple à un robot autonome pour le fraisage.

D'autre part, l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) à la robotique favoriserait le développement de systèmes diagnostiques préopératoires et peropératoires conseillant en temps réel le chirurgien. L'IA est aussi utilisée pour concevoir des implants sur-mesure à l'instar des tiges sur-mesure « UNID » (Medtronic, Medicea) [33]. Ces innovations contribueraient à l'essor d'une chirurgie du rachis davantage personnalisée.

Dans un cadre plus futuriste la chirurgie robot-assistée ravive l'idée de téléchirurgie à longue distance dont la faisabilité a fait l'objet d'une démonstration par le succès en 2001 de l'opération Lindbergh durant laquelle une équipe de l'Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif (IRCAD) menée par le Professeur Marescaux alors qu'il se trouvait à New-York réalise une cholécystectomie assistée par le système robotisé Zeus chez une patiente hospitalisée dans l'enceinte des Hôpitaux universitaires de Strasbourg [34].

Enfin, les perspectives de la robotique chirurgicale sont vastes et devons s'accompagner d'une réflexion éthique à mesure de l'autonomisation de ces technologies sur des sujets liés à la responsabilité médicale et aux données de santé.

10- Conclusion

La chirurgie du rachis robot-assistée apparaît être un outil complémentaire sûr garantissant une qualité et une reproductibilité du geste chirurgical. Elle ne se substitue pas aux connaissances de base du chirurgien. Une formation spécialisée, la réalisation de plusieurs cas et une expérience clinique sont nécessaires à l'utilisation de cette technologie et permettent d'appréhender ses complications potentielles ; ce qui sous-tend l'existence d'une courbe d'apprentissage. La planification préopératoire et la précision de cet outil sont des aspects clés de la réussite d'une procédure chirurgicale robotisée. L'amélioration constante des algorithmes liés à l'usage du robot laisse entrevoir des perspectives innovantes majeures, telles que l'usage en peropératoire de tiges sur mesures et d'aide à la prise de décision en termes de correction à apporter. Davantage d'études sont nécessaires mais cette technologie semble déjà prometteuse.

Références bibliographiques

- [1] Ahmadpour N, Randall H, Choksi H, Gao A, Vaughan C, Poronnik P. Virtual Reality interventions for acute and chronic pain management. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology* 2019;114:105568. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2019.105568>.
- [2] Choy G, Khalilzadeh O, Michalski M, Do S, Samir AE, Pianykh OS, et al. Current Applications and Future Impact of Machine Learning in Radiology. *Radiology* 2018;288:318–28. <https://doi.org/10.1148/radiol.2018171820>.
- [3] Hogarty DT, Su JC, Phan K, Attia M, Hossny M, Nahavandi S, et al. Artificial Intelligence in Dermatology—Where We Are and the Way to the Future: A Review. *Am J Clin Dermatol* 2020;21:41–7. <https://doi.org/10.1007/s40257-019-00462-6>.
- [4] Nyberg EL, Farris AL, Hung BP, Dias M, Garcia JR, Dorafshar AH, et al. 3D-Printing Technologies for Craniofacial Rehabilitation, Reconstruction, and Regeneration. *Ann Biomed Eng* 2017;45:45–57. <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1668-5>.
- [5] Edgar L, Pu T, Porter B, Aziz JM, La Pointe C, Asthana A, et al. Regenerative medicine, organ bioengineering and transplantation. *British Journal of Surgery* 2020;107:793–800. <https://doi.org/10.1002/bjs.11686>.
- [6] Petrik V, Apok V, Britton JA, Bell BA, Papadopoulos MC. Godfrey Hounsfield and the Dawn of Computed Tomography. *Neurosurgery* 2006;58:780–7. <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000204309.91666.06>.
- [7] Damadian R. Tumor Detection by Nuclear Magnetic Resonance. *Science* 1971;171:1151–3. <https://doi.org/10.1126/science.171.3976.1151>.
- [8] Compston A. The structure and functions of the cerebellum examined by a new method. By Sir Victor Horsley, FRS, FRCS and R.H. Clarke, MA, MB. *Brain* 1908; 31; 45-124. *Brain* 2007;130:1449–52. <https://doi.org/10.1093/brain/awm115>.
- [9] Leksell L. The stereotaxic method and radiosurgery of the brain. *Acta Chir Scand* 1951;102:316–9.
- [10] Harary M, Cosgrove GR. Jean Talairach: a cerebral cartographer. *Neurosurgical Focus* 2019;47:E12. <https://doi.org/10.3171/2019.6.FOCUS19320>.
- [11] Spiegel EA. ANSOTOMY IN PARALYSIS AGITANS. *Arch NeurPsych* 1954;71:598. <https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1954.02320410060005>.
- [12] Watanabe E, Watanabe T, Manaka S, Mayanagi Y, Takakura K. Three-dimensional digitizer (neuronavigator): New equipment for computed tomography-guided stereotaxic surgery. *Surgical Neurology* 1987;27:543–7. [https://doi.org/10.1016/0090-3019\(87\)90152-2](https://doi.org/10.1016/0090-3019(87)90152-2).
- [13] Coburger J, Merkel A, Scherer M, Schwartz F, Gessler F, Roder C, et al. Low-grade Glioma Surgery in Intraoperative Magnetic Resonance Imaging: Results of a Multicenter Retrospective Assessment of the German Study Group for Intraoperative Magnetic Resonance Imaging. *Neurosurgery* 2016;78:775–86. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000001081>.
- [14] Leroy H-A, Delmaire C, Le Rhun E, Drumez E, Lejeune J-P, Reyns N. High-field intraoperative MRI and glioma surgery: results after the first 100 consecutive patients. *Acta Neurochir* 2019;161:1467–74. <https://doi.org/10.1007/s00701-019-03920-6>.
- [15] Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayati S. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng* 1988;35:153–60. <https://doi.org/10.1109/10.1354>.
- [16] Ernst S. Robotic approach to catheter ablation. *Current Opinion in Cardiology* 2008;23:28–31. <https://doi.org/10.1097/HCO.0b013e3282f2c95c>.
- [17] Buchs NC, Bucher P, Pugin F, Hagen ME, Morel P. Robot-Assisted Oncologic Resection for Large Gastric Gastrointestinal Stromal Tumor: A Preliminary Case Series. *Journal of*

- Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques 2010;20:411–5. <https://doi.org/10.1089/lap.2009.0385>.
- [18] Nemoto Y, Kuroda K, Mori M, Kanayama M, Kuwata T, Takenaka M, et al. Robot-assisted thoracoscopic resection of a posterior mediastinal tumor with preserving the artery of Adamkiewicz. *Surg Case Rep* 2022;8:129. <https://doi.org/10.1186/s40792-022-01487-6>.
- [19] Varma TRK, Eldridge P. Use of the NeuroMate stereotactic robot in a frameless mode for functional neurosurgery. *Int J Med Robotics Comput Assist Surg* 2006;2:107–13. <https://doi.org/10.1002/rcs.88>.
- [20] Chenin L, Peltier J, Lefranc M. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion with the ROSATM Spine robot and intraoperative flat-panel CT guidance. *Acta Neurochir* 2016;158:1125–8. <https://doi.org/10.1007/s00701-016-2799-z>.
- [21] Li Y, Chen L, Liu Y, Ding H, Lu H, Pan A, et al. Accuracy and safety of robot-assisted cortical bone trajectory screw placement: a comparison of robot-assisted technique with fluoroscopy-assisted approach. *BMC Musculoskelet Disord* 2022;23:328. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-05206-y>.
- [22] Stull JD, Mangan JJ, Vaccaro AR, Schroeder GD. Robotic Guidance in Minimally Invasive Spine Surgery: a Review of Recent Literature and Commentary on a Developing Technology. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2019;12:245–51. <https://doi.org/10.1007/s12178-019-09558-2>.
- [23] Čapek K, Selver P, Playfair N. R.U.R. (Rossum’s universal robots). United States: Dover Publications : Made available through hoopla; 2014.
- [24] Nof SY, editor. Handbook of industrial robotics. 2nd ed. New York: John Wiley; 1999.
- [25] Global Medical Robots Market Size By Product (Instruments and Accessories, Robotic Systems), By Application (Laparoscopy, Orthopedic Surgeries, Neurosurgeries, Pharmacy Applications), By Geographic Scope And Forecast 2022.
- [26] Barbagallo G, Yoder E, Dettori J, Albanese V. Percutaneous minimally invasive versus open spine surgery in the treatment of fractures of the thoracolumbar junction: a comparative effectiveness review. *Evidence-Based Spine-Care Journal* 2013;3:43–9. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1327809>.
- [27] Parker SL, Adogwa O, Witham TF, Aaronson OS, Cheng J, McGirt MJ. Post-Operative Infection after Minimally Invasive versus Open Transforaminal Lumbar Interbody Fusion (TLIF): Literature Review and Cost Analysis. *Minim Invasive Neurosurg* 2011;54:33–7. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1269904>.
- [28] Serban D, Calina N, Tender G. Standard versus Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion: A Prospective Randomized Study. *BioMed Research International* 2017;2017:1–5. <https://doi.org/10.1155/2017/7236970>.
- [29] Vergara P, Akhunbay-Fudge CY, Kotter MR, Charles Laing RJ. Minimally Invasive Versus Open Surgery for Lumbar Synovial Cysts. *World Neurosurgery* 2017;108:555–9. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.09.039>.
- [30] Barrie J, Jayne DG, Wright J, Murray CJC, Collinson FJ, Pavitt SH. Attaining Surgical Competency and Its Implications in Surgical Clinical Trial Design: A Systematic Review of the Learning Curve in Laparoscopic and Robot-Assisted Laparoscopic Colorectal Cancer Surgery. *Ann Surg Oncol* 2014;21:829–40. <https://doi.org/10.1245/s10434-013-3348-0>.
- [31] Yu J, Zhang Q, Fan M-X, Han X-G, Liu B, Tian W. Learning curves of robot-assisted pedicle screw fixations based on the cumulative sum test. *WJCC* 2021;9:10134–42. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v9.i33.10134>.
- [32] Kam JKT, Gan C, Dimou S, Awad M, Kavar B, Nair G, et al. Learning Curve for Robot-Assisted Percutaneous Pedicle Screw Placement in Thoracolumbar Surgery. *Asian Spine J* 2019;13:920–7. <https://doi.org/10.31616/asj.2019.0033>.
- [33] Sadrameli SS, Boghani Z, Steele Iii WJ, Holman PJ. Utility of Patient-Specific Rod Instrumentation in Deformity Correction: Single Institution Experience. *Spine Surg Relat Res* 2020;4:256–60. <https://doi.org/10.22603/ssrr.2019-0101>.

[34] Marescaux J, Leroy J, Gagner M, Rubino F, Mutter D, Vix M, et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature* 2001;413:379–80. <https://doi.org/10.1038/35096636>.

Annexes

ASA Physical Status Classification System

1 : Patient normal

2 : Patient avec anomalie systémique modérée

3 : Patient avec anomalie systémique sévère

4 : Patient avec anomalie systémique sévère représentant une menace vitale constante

5 : Patient moribond dont la survie est improbable sans l'intervention

6 : Patient déclaré en état de mort cérébrale dont on prélève les organes pour greffe

Ces définitions sont disponibles dans l'édition annuelle du "ASA Relative Value Guide". Il n'y a pas d'informations supplémentaires pouvant aider à mieux classer les patients.

Référence :

- <http://www.asahq.org/clinical/physicalstatus.htm>

Échelle d'incapacité d'Oswestry

Ce questionnaire a été conçu pour donner au thérapeute des renseignements sur la manière dont la lombalgie a perturbé votre vie quotidienne. Ayez l'amabilité de remplir chacune des sections, et cochez dans chaque section uniquement la boîte qui s'applique à votre cas.

Il se peut que deux des questions d'une section paraissent représenter votre cas, mais prenez soin de cocher seulement celle qui décrit très précisément votre problème. Veuillez, s'il vous plaît, répondre à ce questionnaire. Il est conçu pour nous informer de l'effet de votre problème de dos (ou de jambe) dans votre vie de tous les jours.

S'il vous plaît, répondez à chaque section. Cochez une seule case pour chaque section qui vous décrit le mieux aujourd'hui.

Section 1--- Intensité de la douleur

- Je n'ai pas de douleur en ce moment.
- La douleur est très légère en ce moment.
- La douleur est modérée en ce moment.
- La douleur est assez forte en ce moment.
- La douleur est très forte en ce moment.
- La douleur est la pire qu'on puisse imaginer en ce moment.

Section 2--- Soins personnels (se laver, s'habiller, etc)

- Je peux faire mes soins personnels sans augmenter la douleur.
- Je peux faire mes soins personnels mais cela augmente la douleur.
- C'est douloureux de faire mes soins personnels et je les fais lentement et avec précaution.
- J'ai besoin d'un peu d'aide mais je peux faire la plupart de mes soins personnels.
- J'ai besoin d'aide tous les jours pour la plupart de mes soins personnels.
- Je ne m'habille pas, je me lave avec difficulté et je reste au lit.

Section 3--- Soulever des objets

- Je peux soulever des objets lourds sans augmenter la douleur.
- Je peux soulever des objets lourds mais cela augmente la douleur.
- La douleur m'empêche de soulever des objets lourds à partir du sol mais je peux les soulever s'ils sont bien placés, par exemple sur une table.
- La douleur m'empêche de soulever des objets lourds mais je peux soulever des objets légers ou moyens s'ils sont bien placés.
- Je peux seulement soulever des objets très légers.
- Je ne peux rien soulever ni transporter.

Section 4--- Marcher

- La douleur ne m'empêche pas de marcher peu importe la distance.
- La douleur m'empêche de marcher plus d'un mille (1,5 kilomètres).
- La douleur m'empêche de marcher plus d'un demi-mille (0,75 kilomètre).
- La douleur m'empêche de marcher plus de 100 verges (100 mètres).
- Je peux marcher seulement à l'aide d'une canne ou de béquilles.

- Je suis au lit la plupart du temps et je dois ramper pour aller aux toilettes.

Section 5--- S'asseoir

- Je peux m'asseoir sur n'importe quel fauteuil aussi longtemps que je le veux.
- Je peux m'asseoir sur mon fauteuil préféré aussi longtemps que je le veux.
- La douleur m'empêche de m'asseoir plus d'une heure.
- La douleur m'empêche de m'asseoir plus d'une demi-heure.
- La douleur m'empêche de m'asseoir plus de 10 minutes.
- La douleur m'empêche complètement de m'asseoir.

Section 6--- Se tenir debout

- Je peux me tenir debout aussi longtemps que je le veux sans augmenter la douleur.
- Je peux me tenir debout aussi longtemps que je le veux mais cela augmente la douleur.
- La douleur m'empêche de me tenir debout plus d'une heure.
- La douleur m'empêche de me tenir debout plus d'une demi-heure.
- La douleur m'empêche de me tenir debout plus de 10 minutes.
- La douleur m'empêche complètement de me tenir debout.

Section 7--- Dormir

- Mon sommeil n'est jamais perturbé par la douleur.
- Mon sommeil est parfois perturbé par la douleur.
- À cause de la douleur, j'ai moins de 6 heures de sommeil.
- À cause de la douleur, j'ai moins de 4 heures de sommeil.
- À cause de la douleur, j'ai moins de 2 heures de sommeil.
- La douleur m'empêche complètement de dormir.

Section 8--- Vie sexuelle (si s'applique)

- Ma vie sexuelle est normale et elle ne cause pas d'augmentation de la douleur.
- Ma vie sexuelle est normale mais elle cause une certaine augmentation de la douleur.
- Ma vie sexuelle est presque normale mais elle est très douloureuse.
- Ma vie sexuelle est très limitée par la douleur.
- Ma vie sexuelle est presque absente à cause de la douleur.
- La douleur empêche toute vie sexuelle.

Section 9--- Vie sociale

- Ma vie sociale est normale et ne me cause pas d'augmentation de la douleur.
- Ma vie sociale est normale mais elle augmente le niveau de la douleur.
- La douleur n'a pas d'effet important sur ma vie sociale à part de limiter mes activités les plus vigoureuses, par exemple le sport, etc.
- La douleur a limité ma vie sociale et je ne sors plus autant qu'avant.
- La douleur a limité ma vie sociale à mon domicile.
- Je n'ai pas de vie sociale à cause de la douleur.

Section 10--- Se déplacer

- Je peux me déplacer n'importe où sans douleur.
- Je peux me déplacer n'importe où mais cela augmente la douleur.
- La douleur est forte mais je peux me déplacer plus de deux heures.
- La douleur me limite à des déplacements de moins d'une heure.
- La douleur me limite à de courts déplacements nécessaires de moins de 30 minutes.
- La douleur m'empêche de me déplacer sauf pour recevoir des traitements.

Score global d'handicap fonctionnel

Total des scores partiels : .../... (sur 50 au maximum)

Résultat en pourcentage (score ODI) :%

AUTEUR : Nom : SAGENLY

Prénom : Malick

Date de soutenance : 22 septembre 2023 à 18 heures

Titre de la thèse : Chirurgie du rachis assistée par robot : courbe d'apprentissage

Thèse - Médecine - Lille « 2023 »

Cadre de classement : Neurochirurgie

DES + FST/option : Neurochirurgie

Mots-clés : rachis, robotique chirurgicale, chirurgie du rachis, Mazor, courbe d'apprentissage

Résumé :

La robotique chirurgicale, représente une avancée majeure en matière de soins. Elle contribue à davantage de précision et de sécurité du geste chirurgical. Largement diffusée au sein de spécialités comme la neurochirurgie, la chirurgie viscérale ou l'urologie, son utilisation en chirurgie du rachis est récente et peu développée. Nous proposons, à travers l'expérience lilloise de décrire l'initiation d'une équipe neurochirurgicale à la chirurgie robot-assistée du rachis en étudiant sa courbe d'apprentissage, le flux de travail mais aussi les complications potentielles et les perspectives de cette technologie.

Son acquisition requiert un plateau technique adapté et son utilisation nécessite une formation théorique et pratique de l'équipe chirurgicale. Une collaboration étroite entre l'équipe chirurgicale et les ingénieurs est impérative pour garantir un usage et des résultats optimaux du système robotisé. La planification préopératoire est une étape majeure qui repositionne le patient au centre de la réflexion du chirurgien et contribue au développement d'une chirurgie plus personnalisée. Nombreuses sont les indications qui peuvent faire l'objet d'une chirurgie du rachis robot-assistée. L'installation est une étape chronophage. Nous avons observé une tendance à la diminution de nos durées opératoires à mesure des cas opérés et l'absence de complications graves.

La chirurgie du rachis robot-assistée contribue à l'amélioration des soins et à leur standardisation pour une meilleure prise en charge de nos patients. Elle semble répondre à une courbe d'apprentissage courte qu'il conviendra de mettre en évidence par des études à plus long terme et, doit faire face à certaines limites, notamment techniques et de coût. Cependant, elle se développe progressivement et génère de concert avec l'intelligence artificielle des perspectives nouvelles de meilleure assistance à la correction de déformation, de technologies plus autonomes pour la réalisation de certaines tâches sous la supervision du chirurgien et alimente la possibilité de téléchirurgie.

Composition du Jury :

Président : Monsieur le Professeur Richard ASSAKER

Asseseurs :

Monsieur le Professeur Jean-Paul LEJEUNE

Monsieur le Docteur Laurent DO

Monsieur le Docteur Christian DURIEZ

Directeur de thèse : Monsieur le Docteur Henri-Arthur LEROY