

INTRODUCTION D'UN NOUVEAU ROBOT EN ORL

4.1 Introduction

Nous avons étudié, dans les deux chapitres précédents, l'anatomie particulière de l'oreille et du massif facial et la chirurgie qui s'y rapporte (2), et les caractéristiques de ces espaces de travail (3). La littérature nous a apporté des données sur les gestes du chirurgien lors de ces procédures [12]. Nous avons donc défini les caractéristiques des chirurgies concernées. Suivant des propositions de plan pour la conception de robots chirurgicaux [54], nous pouvons désormais analyser les solutions techniques qui pourraient être proposées dans ce contexte, puis vérifier ces choix.

Il nous faut ainsi poser les bases de notre futur système robotique, savoir quels seront ses objectifs et comment il se démarque des propositions existantes. Plusieurs questions se posent alors :

- *quelles sont les fonctions et les contraintes auxquelles ce robot devrait répondre ?*
- *quels sont les robots existants dans les domaines de la chirurgie de l'oreille et des sinus ? Notre système serait-il innovant par rapport aux robots déjà étudiés et/ou brevetés ?*
- *quelles sont les attentes du milieu médical et du milieu industriel vis-à-vis d'un robot chirurgical porte-endoscope ?*

Pour répondre à ces questions, un état de l'art des robots étudiés en chirurgie otologique et sinusienne est présenté (4.2). Ensuite, une analyse fonctionnelle est réalisée (4.3), présentant les fonctions auxquelles notre système robotique devrait répondre. Pour savoir si nos propositions sont innovantes, une veille de brevets est ensuite réalisée (4.4), et un dépôt de brevet dans le cas échéant (4.5). Enfin, une étude de marché (4.6) permet de savoir si notre système répondrait aux attentes des chirurgiens de ces spécialités, et

quel serait l’intérêt des industriels dans ce domaine.

4.2 État de l’art des robots en chirurgie otologique et sinusienne

4.2.1 Robots en otologie

Lors d’une chirurgie de l’oreille moyenne, le chirurgien, et donc le système robotique, doit faire face à plusieurs contraintes : un champ de vision limité, et de nombreuses structures anatomiques importantes dans un espace restreint. De plus, cette micro-chirurgie dépend de la dextérité du chirurgien, et est soumise aux tremblements de ses mains.

Nous pouvons classer les systèmes robotiques chirurgicaux dédiés à l’otologie en fonction de leur application médicale :

- les robots de fraisage mastoïdien (4.2.1.1), dans le cadre de l’implantation cochléaire. L’objectif est de sécuriser ce trajet passant à proximité immédiate de la 3ème portion du nerf facial.
- les robots conçus pour remplacer la main du chirurgien lors de la mise en place de prothèse ossiculaire ou d’implant cochléaire (4.2.1.2). Leur objectif est d’accroître la précision du geste, en éliminant les tremblements liés au chirurgien.
- les robots porte-endoscope (4.2.1.3), robots assistants visant à interagir avec le chirurgien pour faciliter la chirurgie oto-endoscopique. L’objectif est de libérer une main du chirurgien pour lui permettre d’opérer avec deux instruments à la fois, tout en bénéficiant de l’endoscope maintenu par le robot.

4.2.1.1 Robots de fraisage mastoïdien

La majorité des robots otologiques sont développés pour le fraisage mastoïdien dans le cadre de l’implantation cochléaire. Ils partagent la possibilité de fraiser selon un trajet prédéfini, grâce à des images de scanner pré-opératoire. Ces robots fraisent à la place du chirurgien, jusqu’à la fenêtre ronde au niveau de la caisse du tympan.

Leur objectif commun est de sécuriser ce trajet, qui passe à proximité immédiate de la 3ème portion du nerf facial.

A un stade pré-clinique, un système a été proposé [14, 55] pour creuser un tunnel à travers le récessus facial, en utilisant un robot industriel (KUKA KR3, Figure 4.1). Ce

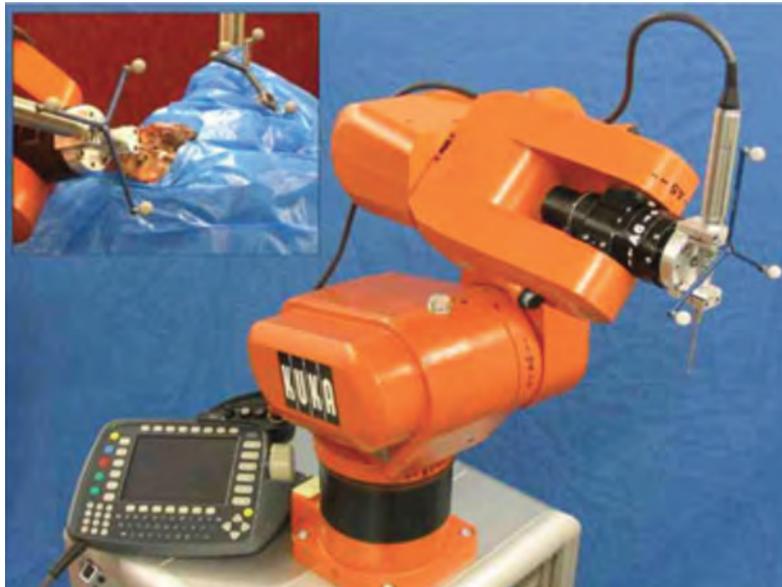


FIGURE 4.1 – Robot industriel Kuka proposé pour le fraisage mastoïdien dans la chirurgie d'implant cochléaire [14].

Le système présente une architecture sérielle avec 6 Degrés de Liberté (DDL), et équipé d'un scanner et d'un logiciel de contrôle guidé par l'image. Cependant, la précision était trop faible (0,5mm en moyenne), et l'utilisation d'un robot industriel n'est pas compatible avec une application clinique.

L'équipe de Danilchenko et al [15] utilisait également un robot industriel (Mitsubishi RV-3S) pour réaliser une mastoïdectomie. Le système, nommé OTOBOT, se veut un système autonome permettant de planifier un fraisage, associant robot industriel et tracking optique pour vérifier le positionnement de l'outil. D'après scanner, le chirurgien entoure sur logiciel la zone d'os à enlever (Figure 4.2), puis contrôle durant la procédure le positionnement correct de l'effecteur par rapport aux structures anatomiques. La valeur d'erreur maximale après fraisage de trois rochers cadavériques était de 0,6 mm, ce qui semble élevé au vu de l'anatomie de l'oreille.

L'équipe de Dillon [16] proposait également d'automatiser la procédure de mastoïdectomie, en proposant un robot compact, attaché à l'os du crâne du patient (Figure 4.3). Le prototype était un robot à 4 DDL, monté sur un cadre de positionnement pour l'attache osseuse. A nouveau, un scanner était nécessaire pour que le chirurgien contoure manuellement la zone à fraiser. La précision moyenne du système était de 0,5 mm, ce qui semble insuffisant, comme pour les deux précédents robots.

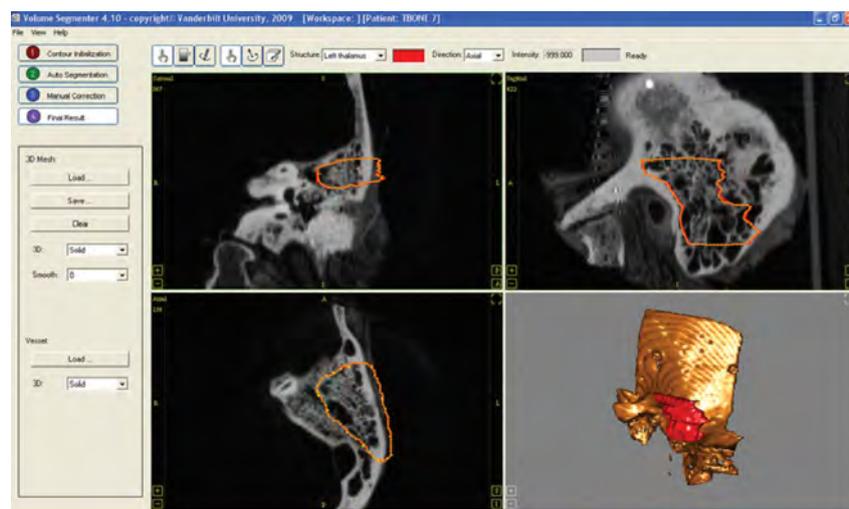


FIGURE 4.2 – Logiciel de contourage de la zone de fraisage du système OTOBOT [15].

Microtable est un autre système [17] étudié pour réaliser un fraisage mastoïdien. Il s’agit d’une architecture parallèle de type Gough-Stewart, attachée à la tête du patient par des vis à ancrage osseux (Figure 4.4). Cela permet d’éviter le recours à des systèmes de suivi de mouvements de la tête du sujet. Un logiciel de planification du fraisage permet, à partir d’images de scanner pré-opératoire, de définir une trajectoire optimale pour le robot. Ce système était testé au stade pré-clinique sur des rochers en laboratoire d’anatomie.

Un autre robot a été imaginé par l’équipe de Kobler [18] utilisant une architecture identique, de type Gough-Stewart avec 6 pieds connectant la plate-forme mobile et la base, fixée sur l’os temporal. L’objectif est à nouveau d’augmenter la précision et d’éviter le recours à un tracking optique en se fixant directement sur la tête du patient. Le projet RoboJig a permis de faire évoluer ce dispositif à un stade pré-clinique, avec des essais de fraisage sur os cadavérique, principalement en réalisant un tunnel mastoïdien après repérage des structures anatomiques à risque. Ce système a ensuite été testé pour réaliser l’insertion du porte-électrode dans la cochlée [56].

Ces différents robots ne permettent pas de distinguer os et tissu mou ; l’équipe de Birmingham [19] a développé un système de fraisage permettant de faire cette distinction, grâce à la force appliquée sur l’instrument. Le robot, appelé “Smart Micro-Drill” (Figure 4.6), fraise automatiquement, mais lorsque la fraise ne touche plus de tissu osseux,

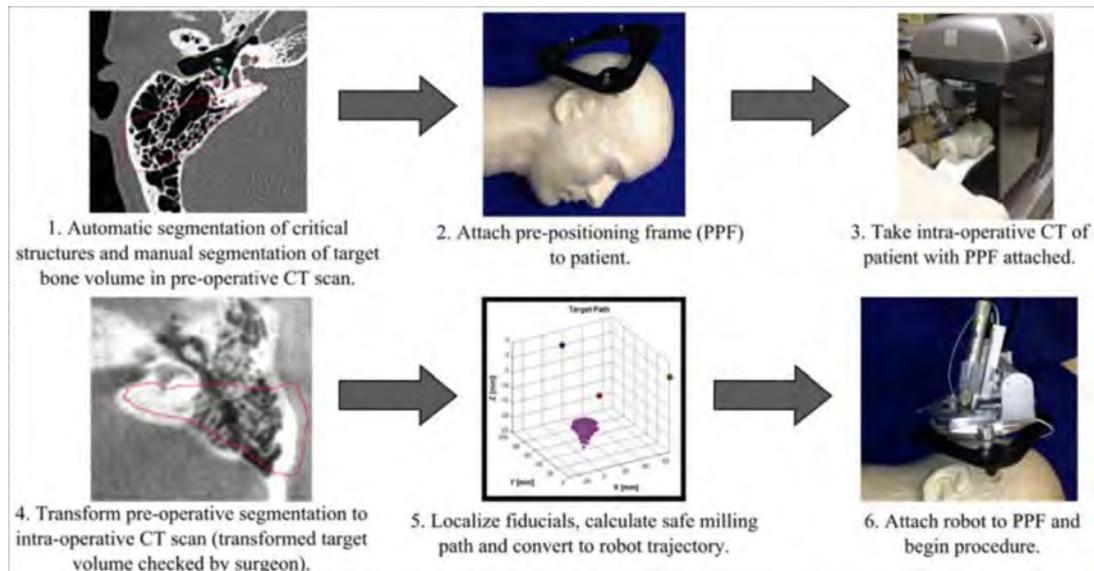
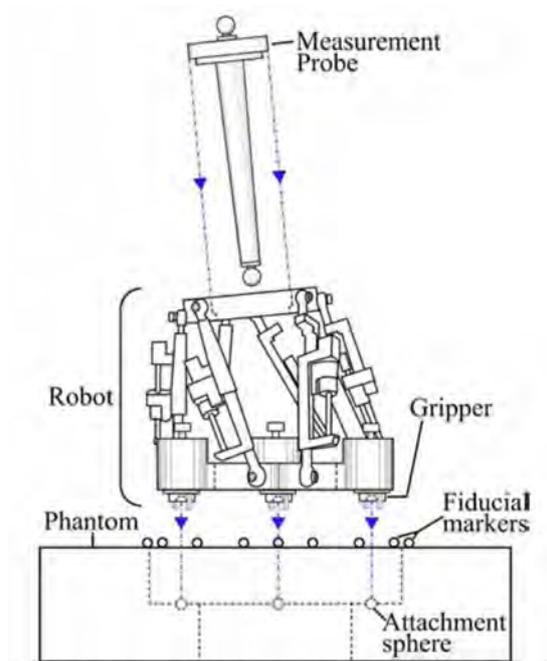


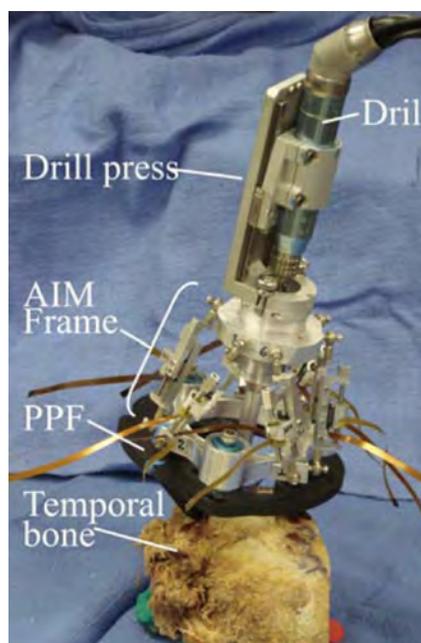
FIGURE 4.3 – Système de fraisage attaché au crâne du patient, avec étape de contournage de la zone à fraiser sur scanner per-opératoire [16].

la force exercée chute. Cela permettrait de protéger les structures de l'oreille interne lors d'un fraisage. Ainsi, une étude en salle d'opération sur trois patients [57] a montré que l'utilisation de ce robot pour la cochléostomie était sûre, et permettait de préserver le labyrinthe membraneux.

On peut citer également une étude ayant utilisé le robot Da Vinci pour réaliser le fraisage mastoïdien [20]. Sur deux rochers en laboratoire d'anatomie, un adaptateur imprimé en 3D a été positionné sur un bras du robot, afin de lui permettre de maintenir une fraise. Ensuite, la mastoïdectomie a été réalisée à l'aide du Da Vinci, selon la technique opératoire habituelle. Une image augmentée des structures anatomiques acquises par scanner pré-opératoire était fournie au niveau de la console du robot pour le chirurgien (Figure 4.7. Pour cela, le chirurgien contournait manuellement les structures sur un logiciel, après acquisition scanner. Cependant, d'après les auteurs eux-mêmes, la visualisation de la zone opératoire était moins bonne qu'en microscopie conventionnelle. De plus, l'absence de retour de force était considérée comme gênante. Enfin et surtout, l'encombrement important du robot rendait impossible la réalisation correcte de l'ouverture du récessus facial au robot, puis de la cochléostomie. Ces deux étapes chirurgicales ont donc été réalisées manuellement par le chirurgien, alors qu'il s'agit précisément des parties minutieuses de l'intervention. La mise en place de l'implant était également réalisée manuellement, donc sans gain en termes de diminution des tremblements lors de

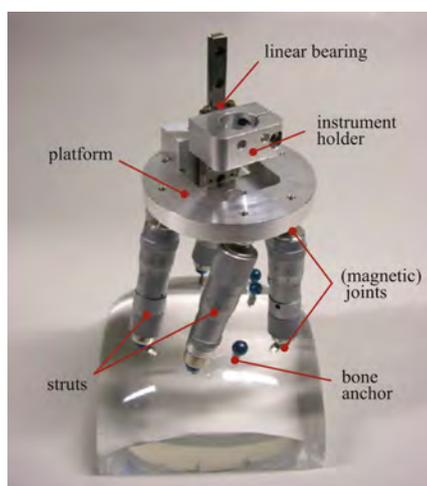


(a) Schéma de l'architecture parallèle du Microtable.



(b) Robot Microtable directement attaché à l'os temporal.

FIGURE 4.4 – Robot Microtable pour le fraisage mastoïdien [17].



(a) Robot parallèle du RoboJig, de type Gough-Stewart.



(b) Robot RoboJig directement attaché à l'os temporal, comme le Microtable.

FIGURE 4.5 – Robot parallèle développé pour le fraisage mastoïdien dans la chirurgie de l'implant cochléaire [18].



FIGURE 4.6 – Système “Smart Micro-Drill”, utilisé pour le fraisage de la cochlée avec arrêt automatique lorsqu’il n’y a plus d’os [19].

l’insertion.

Un système robotique différent a été élaboré au ARTORG Center à Berne [58], et augmente la précision cible en utilisant un robot dédié, compatible avec une application clinique. Ce robot présente une architecture sérielle avec 5 DDL, et s’attache directement à la table d’opération. En effet, le poids de la structure est léger (5,5kg). Enfin, un système de tracking optique est utilisé pour contrôler la position des instruments par rapport au patient en début de procédure, puis la position du robot au fur et à mesure du fraisage. Un monitoring du nerf facial est intégré à l’effecteur du robot.

Cette recherche a conduit à une étude clinique sur 9 patients en 2019 [21]. Le trajet est tout d’abord défini sur la base d’images scanographiques pré-opératoires, en ciblant la fenêtre ronde. Puis le robot perce un tunnel en suivant ce trajet jusqu’au récessus facial ; un contrôle peropératoire est réalisé pour vérifier la position de la fraise par rapport aux structures anatomiques à respecter. L’ouverture de la fenêtre ronde puis l’insertion de l’implant cochléaire est ensuite effectué manuellement par le chirurgien.

Une version commerciale de ce robot microchirurgical nommé HEARO (Figure 4.8) est désormais développé par CAScination et Med-El (fabriquant d’implant cochléaire), avec marquage CE depuis mai 2020.

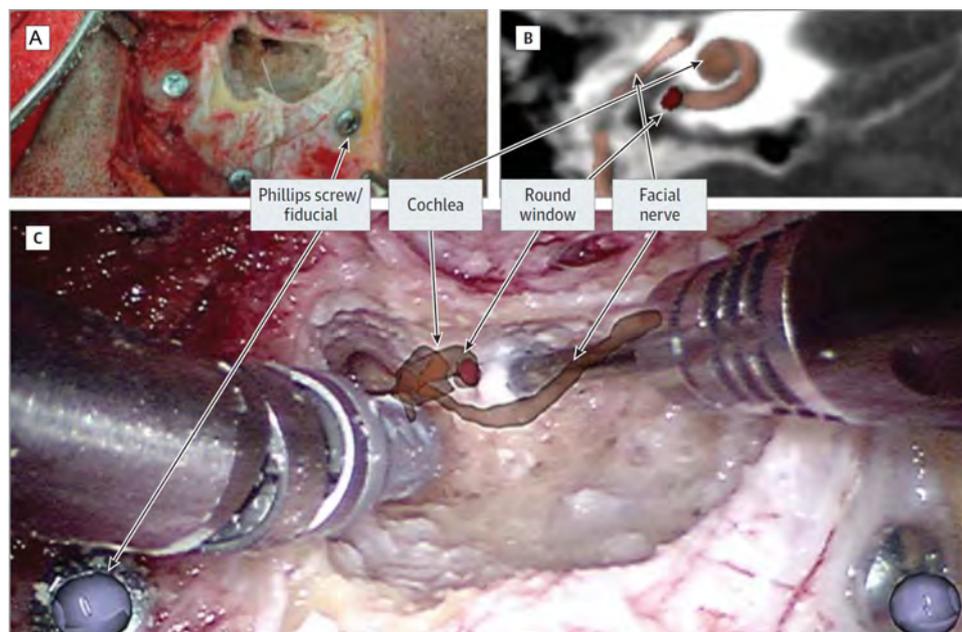


FIGURE 4.7 – A. Image per-opératoire d’une mastoïdectomie réalisée avec le robot Da Vinci. B. Scanner du rocher en coupe coronale montrant plusieurs structures anatomiques à respecter. C. Capture de l’écran du robot Da Vinci tel que visualisé par le chirurgien, avec structures anatomiques apparaissant sur l’écran [20].

4.2.1.2 Robots de chirurgie ossiculaire ou d’implantation cochléaire

Peu de robots ont été spécifiquement conçu en vue d’une application à la chirurgie ossiculaire, comparativement à la chirurgie de fraisage. Ils sont conçus pour remplacer la main du chirurgien lors de gestes microscopiques, comme le placement d’une prothèse ossiculaire ou l’insertion d’un implant cochléaire.

Leur objectif commun est d’accroître la précision du geste, en éliminant les tremblements liés au chirurgien.

En 2013, l’équipe de Enstfellner a développé MMTS [22], conçu pour les stapédecotomies. Ce robot a 6 DDL et un joystick (Figure 4.9) pour contrôler l’effecteur. Des capteurs de force permettent de mesurer la force appliquée à l’extrémité de l’instrument. Ce système permet au chirurgien de contrôler la mise en place de la prothèse ossiculaire, avec une précision d’environ 1,6 mm. Cependant, une étude avec 10 chirurgiens ORL [59] comparait la précision obtenue pour toucher un point précis sur la platine de l’étrier, entre l’utilisation de ce robot et manuellement. La précision n’était pas améliorée par l’utilisation du robot, voire était meilleure en valeurs absolues lors d’une approche ma-

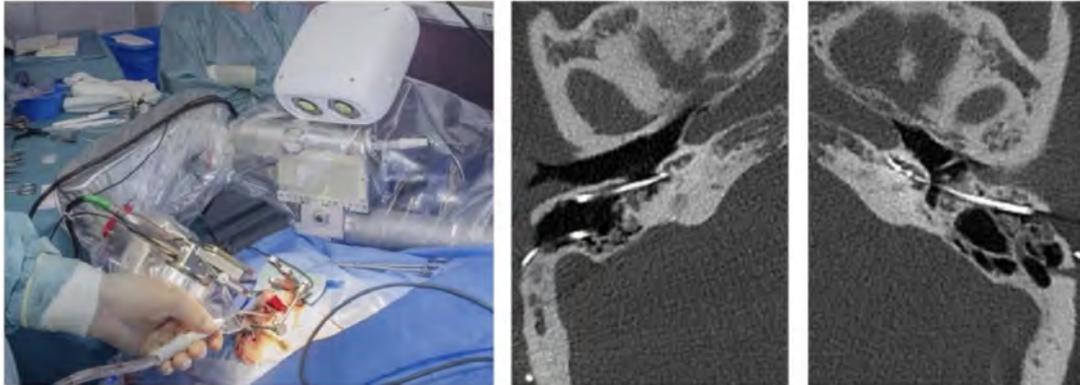


FIGURE 4.8 – Robot HEARO en salle de chirurgie, avec système de tracking optique, à gauche. Coupes axiales de scanners montrant un implant posé par voie conventionnelle (au milieu) et par voie robotisée (à droite) [21].

nuelle. La courbe d'apprentissage était en revanche plus courte lors de l'utilisation du robot.

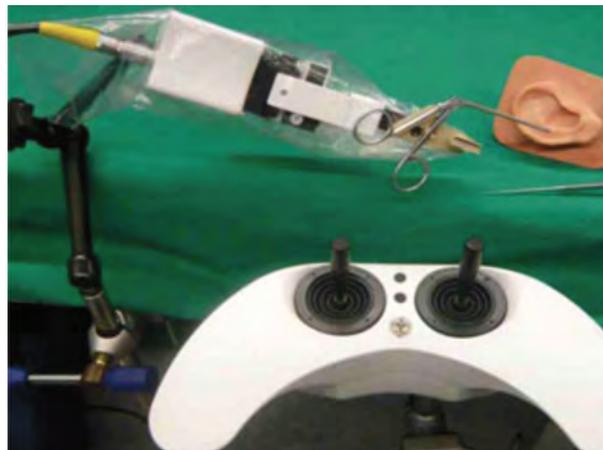


FIGURE 4.9 – Robot MMTS avec commande joystick pour la mise en place de prothèse ossiculaire [22].

L'équipe de l'université Johns Hopkins a développé le "Steady-Hand", robot conçu pour assister le chirurgien en micro-chirurgie [60]. Il s'agit d'une structure parallèle avec un centre de rotation déporté, avec un total de 7 DDL. Des capteurs de forces permettent d'analyser les interactions entre la main du chirurgien et le robot d'une part ; entre l'extrémité de l'instrument et son environnement d'autre part. Initialement utilisé pour la chirurgie ophtalmologique (Figure 4.10), ce système a ensuite été testé pour la stapédoto-

mie. Une évaluation a été menée dans cette application [61], en réalisant la platinotomie et la mise en place du piston avec le robot, comparativement à la chirurgie manuelle. Les auteurs retrouvaient une plus grande précision et des forces plus faibles appliquées à la platine lors de la chirurgie robotisée. Rothbaum [62] confirma ces résultats avec des chirurgiens de niveaux d’expériences variés. Cependant, les jeunes chirurgiens profitaient plus de l’apport du robot que les chirurgiens seniors.

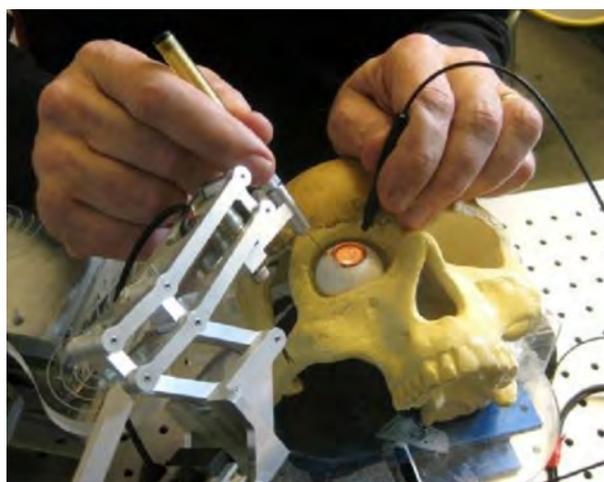


FIGURE 4.10 – Robot Steady-Hand, développé par l’université Johns Hopkins, pour la micro-chirurgie [23].

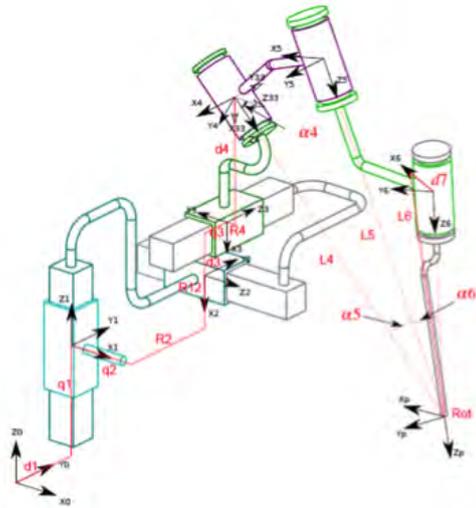
Une équipe française, associant les Pr Sterkers et N’Guyen (ORL, La Pitié Salpêtrière, Paris) et des chercheurs de l’unité Inserm/UPMC UMR-S 1159, a développé le Robotol [63]. Ce robot a obtenu un marquage CE et est distribué commercialement par la société Collin Medical. Il s’agit à l’heure actuelle du seul robot dédié à la fois à la chirurgie de l’oreille moyenne et de l’oreille interne (Figure 4.11). Ce n’est pas un robot de fraisage, comme ceux présenté en 4.2.1.1. Initialement, ce robot a été conçu pour remplacer la main du chirurgien lors de gestes minutieux, afin de supprimer les tremblements et améliorer la précision du geste : mise en place de prothèses ossiculaires, de pistons de stapédotomie ou de mise en place d’implants cochléaires.

Il s’agit d’une architecture en série (Figure 4.11a) avec 7 DDL (3 rotations, 3 translations, un actionnement distal), contrôlée par une “SpaceMouse”. Les dimensions ont été optimisées pour la chirurgie de l’oreille. Le chirurgien utilise la SpaceMouse pour mouvoir le bras robotique, tandis qu’il contrôle le geste en regardant par le microscope opératoire.

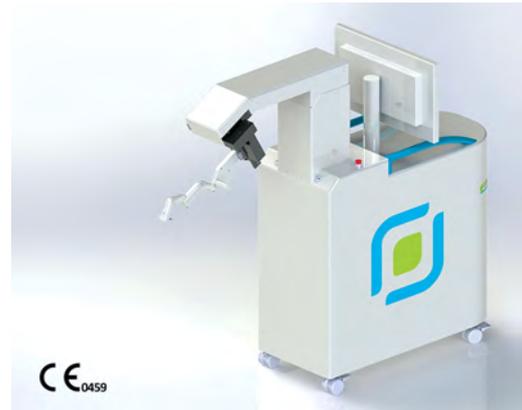
Ce robot a déjà été utilisé au bloc opératoire, avec une étude [64] présentant 9 chirur-

4.2. État de l'art des robots en chirurgie otologique et sinusienne

gies de stapédotomies et 10 poses d'implants cochléaires robo-assistées lors de la mise en place des prothèses et implants. Ces chirurgies se sont déroulées sans complication, avec atteinte des objectifs cliniques.



(a) Schéma de l'architecture en série du Robotol.



(b) Robotol avec certification CE, sous son apparence commercialisée.

FIGURE 4.11 – Système Robotol, conçu pour la chirurgie de l'oreille moyenne et de l'oreille interne. Source : Collin Medical.

Plus tard dans son développement, un second bras a été conçu pour maintenir un endoscope, ce qui sera développé dans la section suivante.

Plusieurs robots cités dans la catégorie des robots de fraisage ont ensuite été testés pour des insertions de porte-électrode dans la cochlée : le RoboJig [56], le Microtable [65], le Steady-Hand [66]. Tous semblaient augmenter la précision du geste d'implantation à un stade pré-clinique.

4.2.1.3 Robots porte-endoscope

Les robots porte-endoscope sont des cobots, ou robots assistants, et ne remplacent pas la main du chirurgien, mais visent à interagir avec lui.

Leur objectif commun est de libérer la main du chirurgien qui tient habituellement l'endoscope. Le chirurgien peut alors opérer avec deux instruments à la fois, comme sous microscope, mais en bénéficiant des avantages de l'endoscope présentés en section 2.3.

Comme pour la chirurgie ossiculaire, peu de robots porte-endoscope ont été développés pour la chirurgie otologique.

Le Robotol, déjà vu en 4.2.1.2, a bénéficié du développement d’un bras porte-endoscope. En effet, bien que son architecture et sa conception initiale ait été conçue autour du geste de précision (pose d’un implant ou d’un piston), ses concepteurs ont décidé d’ajouter un bras porte-endoscope [13] pour répondre à la forte demande exprimée par la communauté chirurgicale. Ainsi, un second bras peut être positionné à la place du bras porte-instrument, et maintenir une optique 0° , 30° ou 45° , de diamètre 3 mm ou moins. L’architecture en série n’est pas modifiée. Le chirurgien peut alors opérer avec ses deux mains, mais la mobilisation du bras se fait toujours par la space-mouse.

Un autre porte-endoscope, nommé Endofix Exo (Figure 4.12), propose de maintenir l’endoscope afin de libérer les mains du chirurgien. Initialement conçu pour la chirurgie abdominale, urologique et gynécologique, ce système a ensuite été étudié [67] pour une utilisation adaptée à la chirurgie endoscopique ORL. Il s’agit d’une architecture en série, avec 3 DDL et des actionneurs pneumatiques, contrôlée par un joystick. Il se fixe à la table d’opération. Cependant, l’étude a permis d’évaluer ce système sur cadavres pour la chirurgie endoscopique des sinus, du larynx et de l’oreille. Pour l’oreille, il n’a été évalué que lors d’endoscopies de la cavité mastoïdienne, ne correspondant pas vraiment à une chirurgie oto-endoscopique classique, mais plutôt à un éventuel abord oto-neurochirurgical de la base du crâne. Il est désormais commercialisé pour une application sinusienne, mais pas pour une chirurgie endoscopique de l’oreille moyenne. Comme pour le Robotol, son contrôle nécessite la main du chirurgien pour manipuler le joystick.

Enfin, on peut citer les recherches de l’équipe de Fichera et al. [24] à propos d’un endoscope miniature robotisé. L’endoscope possède une extrémité orientable à 3 DDL, et une caméra miniaturisée à son extrémité. La mise en fonction d’un tendon d’actionnement central permet d’incurver l’endoscope; celui-ci peut également se translater et tourner autour de son axe (Figure 4.13). Ce dispositif permet de passer à travers la trompe d’Eustache et d’examiner l’oreille moyenne. Cette voie d’abord permet ainsi de ne pas soulever la membrane tympanique.

Un autre dispositif similaire a été présenté récemment [68], et permet au médecin d’examiner la chaîne ossiculaire via la trompe d’Eustache de façon visuelle, grâce à une

4.2. État de l'art des robots en chirurgie otologique et sinusienne



FIGURE 4.12 – Porte-endoscope Endofix Exo, commercialisé par AktorMed GmbH, Allemagne.

caméra intégrée, et haptique, grâce à un micro-instrument intégré.

Cependant, ces robots ne permettent qu'un examen visuel, ou plus récemment une palpation [68], mais ne permettent pas de geste chirurgical. Il s'agit donc de dispositifs à visée diagnostique et non chirurgicale.



FIGURE 4.13 – Endoscope miniature robotisé permettant une inspection de l'oreille moyenne en passant par la trompe d'Eustache [24]

Parmi ces robots porte-endoscope, seul le Robotol est un système évalué et compatible

avec la chirurgie endoscopique de l’oreille moyenne. Mais ce système ne permet pas de s’affranchir d’un contrôle manuel pour sa mobilisation. Par ailleurs, étant optimisé pour l’espace de travail de l’oreille moyenne, il n’est pas adapté à la chirurgie sinusienne.

Tous les robots présentés sont dédiés exclusivement à la chirurgie otologique. Il n’y a pas à l’heure actuelle de robot dédié spécifiquement à la chirurgie endoscopique, permettant de s’affranchir des frontières entre chirurgie de l’oreille et chirurgie endonasale ou neurochirurgie. Un tableau récapitulant les différentes catégories de robots étudiés dans la chirurgie de l’oreille est présenté en tableau 4.1.

Robots de fraisage	Robots de pose de prothèses et implants	Robots pour chirurgie oto-endoscopique
Kuka Kr3[14] 4.1	MMTS [22] 4.9	
Otobot [69] 4.2	Steady-Hand [60] 4.10	
Robot compact et fixé à l’os de l’université Vanderbilt [16] 4.3	<u>Robotol</u> [63] 4.11	<u>Robotol</u> [63] 4.11
<u>Hearo</u> [58] 4.8		
Microtable [17] 4.4	Microtable [17] 4.4 (tests insertion porte-électrode)	
RoboJig [18] 4.5	RoboJig [18] 4.5 (tests insertion porte-électrode)	
Smart Micro-Drill [19] 4.6		

TABLE 4.1 – Tableau récapitulatif des différents robots étudiés pour la chirurgie de l’oreille (les robots ayant un marquage CE sont soulignés).

4.2.2 Robots en chirurgie endonasale

La chirurgie endonasale robotisée répond à plusieurs objectifs :

- permettre au chirurgien d’opérer à deux mains, en libérant la main qui tient usuellement l’endoscope.

- suivre les gestes du chirurgien durant l'intervention. En effet, plusieurs bras porte-endoscope statiques existent [70], mais ils restent immobiles une fois bloqués dans la position voulue. Ces bras statiques ne peuvent alors pas assister le chirurgien en suivant sa gestuelle [13].
- naviguer dans une zone anatomique à risque en toute sécurité. En effet, le massif facial est compris entre plusieurs structures anatomiques importantes : cavité orbitaire, nerf optique, base du crâne, artère carotide interne.

Peu de robots ont été étudiés, comparativement à la chirurgie de l'oreille.

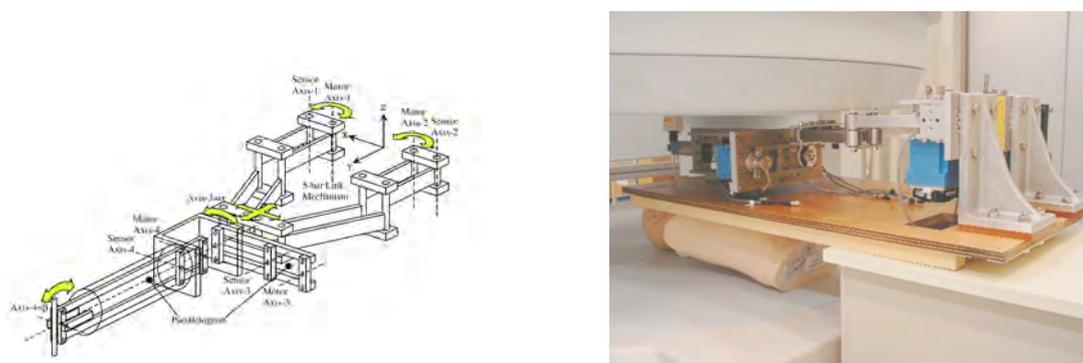
Nous pouvons classer les robots étudiés pour la chirurgie endonasale en deux catégories : ceux qui assistent le chirurgien en portant l'endoscope (4.2.2.1), et ceux qui remplacent le geste du chirurgien pour effectuer une tâche (4.2.2.2).

4.2.2.1 Robots porte-endoscope

Les robots porte-endoscope sont les plus nombreux à avoir été étudiés à un stade pré-clinique en chirurgie endonasale. Ils répondent au premier objectif de libérer une main du chirurgien. Mais très peu répondent aux autres objectifs de collaboration et de navigation. Une précédente revue de la littérature, ciblée sur les robots porte-endoscope des sinus et de la base du crâne, avait été réalisée par l'équipe de Trevillot et al. [71]. Cette étude ne retrouvait, à cette époque, aucun dispositif satisfaisant sur le plan clinique, mais principalement des prototypes de laboratoire.

Un prototype avait été présenté en 2002 par l'équipe de Koseki [25], avec pour cible la neurochirurgie par voie endonasale. L'originalité de ce robot était son architecture parallèle plane (Figure 4.14a), permettant l'utilisation dans une IRM pour navigation en temps réel. En effet, à la différence d'une architecture en série, les différents actionneurs sont positionnés dans le même plan en parallèle. Ce mécanisme à 2 DDL permet à l'endoscope de s'incliner lors de la rotation grâce à un parallélogramme, avec les moteurs à distance de l'outil. Cependant, ce robot restait volumineux, et ne permettait pas au chirurgien d'accéder à la tête du patient pour opérer dans le même temps (Figure 4.14b).

L'équipe de Nathan et al. développa en 2006 le système AESOP, pour Automated Endoscopic System for Optimal Positioning robot [72]. Ce prototype présentait un bras porte-endoscope en série à 7 DDL dont la particularité était d'être contrôlé à la voix. Il a été évalué à un stade pré-clinique sur 10 cadavres dans le cadre d'une chirurgie de la



(a) Architecture d’un robot parallèle porte-endoscope à 2 DDL (b) Prototype en situation sous une machine IRM. L’accès restant libre pour le chirurgien ne paraît pas adapté.

FIGURE 4.14 – Robot porte-endoscope compatible avec une navigation IRM simultanée [25].

selle turcique par voie trans-sphénoïdale. Il était possible de mémoriser certaines positions : ainsi, on pouvait sauvegarder la position 1 (“Save One”) en étant face au méat sphénoïdal, et le chirurgien pouvait retourner à cette position à tout moment en disant “Return One”. Cependant, il ne répondait qu’à des commandes simples et ne tolérait pas des combinaisons de mouvements complexes tels qu’ils sont réalisés manuellement.

En 2011, une autre équipe, Fisher et al., étudia un système robotique adapté à la chirurgie endonasale. Pour les auteurs [26], ce système devait remplir plusieurs critères : être positionné à proximité du site opératoire, être montable et démontable rapidement, et pouvoir être guidé manuellement si besoin. Ils ont alors élaboré un robot qui s’attachait à la table d’opération, avec une architecture parallèle (deux engrenages à 5 pivots montés en parallèle) permettant 4 DDL, et 1 DDL supplémentaire pour la translation axiale de l’endoscope grâce à un moteur linéaire (Figure 4.15). La commande se faisait par deux joysticks, l’un dévolu aux mouvements linéaires de l’endoscope, l’autre pour pivoter et incliner. Cependant, comme souligné par d’autres auteurs [13], l’angle d’inclinaison et de pivot était limité à 5° , et la translation à 50 mm maximum, soit un espace de travail très limité.

Une équipe française a étudié un porte-endoscope nommé SurgiDelta [13], présentant une structure delta avec trois translations suivies par deux articulations pivots, permettant une précision de 0,08 mm et un volume de travail de 1,124 mL. Le contrôle peut



FIGURE 4.15 – Robot porte endoscope de Fisher et al [26], spécifiquement dédié à la chirurgie endonasale, avec commande par deux joysticks.

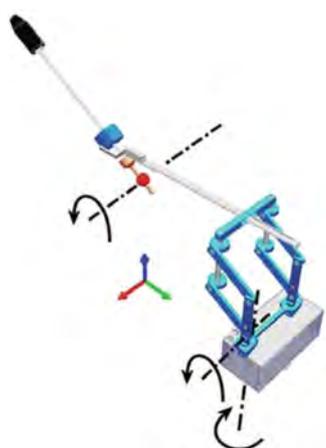
se faire par joystick ou commande vocale, mais également par pédale pour réaliser un nettoyage de l'optique par exemple. 52 chirurgies ont été réalisées avec ce prototype (Figure 4.16), le plus souvent utilisé en tant que bras passif. Les chirurgiens évaluateurs auraient considéré ce prototype comme facile à manipuler, et la commande vocale semblait préférable à la commande par pédale, excepté dans des conditions bruyantes.

Une autre équipe française, ayant déjà travaillé sur l'espace de travail en chirurgie endonasale (3.7), a développé un système porte-endoscope avec centre de rotation déporté. Les auteurs ont comparé trois architectures différentes [12] : EVOLAP, initialement conçu pour la chirurgie laparoscopique, avec un centre de rotation déporté généré par 3 parallélogrammes (Figure 4.17a), et un manipulateur composé d'un cardan à 2 DDL ; VIPER, un robot industriel en série avec 6 DDL ; HYBRID, système mixant les deux premiers systèmes, avec le robot en série VIPER maintenant le manipulateur à cardan du robot EVOLAP (Figure 4.17b). Le contrôle se faisait soit par joystick, soit en mode transparent.



FIGURE 4.16 – Prototype Surgidelta utilisé en salle d'opération, avec système d'aspiration et de lavage intégré (flèche noire) [13].

Pour comparer ces trois systèmes, des chirurgies endonasales ont été réalisées par 4 chirurgiens en laboratoire d'anatomie. Le système HYBRID semblait le plus approprié, car plus simple d'utilisation pour entrer et sortir du nez du patient par exemple. Cependant, les auteurs concluaient qu'une perspective intéressante serait l'utilisation d'un robot dédié à 4 DDL, avec 3 translations pour positionner l'effecteur, et un 4e DDL pour contrôler la rotation de l'endoscope.



(a) Architecture du système EVOLAP, initialement décrit pour la chirurgie laparoscopique.



(b) Système HYBRID, utilisant le robot industriel en série Viper et le manipulateur Evolap, en laboratoire d'anatomie pour la chirurgie endonasale.

FIGURE 4.17 – Comparaison de différents systèmes robotiques en chirurgie endonasale à un stade préclinique [12].

4.2. État de l'art des robots en chirurgie otologique et sinusienne

Le système Endofix Exo (Figure 4.12), déjà cité en partie 4.2.1.3 pour la chirurgie de l'oreille, a été étudié pour une utilisation adaptée à la chirurgie endonasale [67], bien qu'il ne fut pas conçu pour cette utilisation initialement. A un stade pré-clinique sur 27 endoscopies sinusiennes en laboratoire d'anatomie, les auteurs étaient capables d'atteindre tous les sites anatomiques, y compris les plus extrêmes comme le sinus frontal. Cependant, une modification du prototype initial conçu pour la chirurgie abdominale était nécessaire, avec l'ajout de 2 DDL pour obtenir 5 DDL. Cela était rendu nécessaire par l'absence de point pivot fixe, comme le trocart en chirurgie abdominale. Cependant, il faut noter que son contrôle nécessite la main du chirurgien, pour manipuler le joystick.

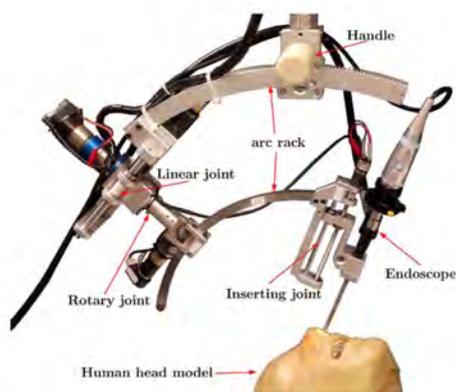
Plus récemment, une équipe de l'université de Hong Kong a développé un robot porte-endoscope dédié à la chirurgie endonasale. La grande originalité de ce système est le contrôle par le pied du chirurgien, d'où le nom du robot : FREE, pour Foot-controlled Robotic-Enabled Endoscope holder [27].

L'architecture du robot, sérielle avec 4 DDL est présentée sur la Figure 4.18a. Elle est composée d'une articulation prismatique, universelle puis prismatique pour l'insertion de l'endoscope, soit PUP [27]. Ce système actif est maintenu par une structure passive sur roulettes, permettant de placer le centre de rotation déporté à l'orifice narinaire.

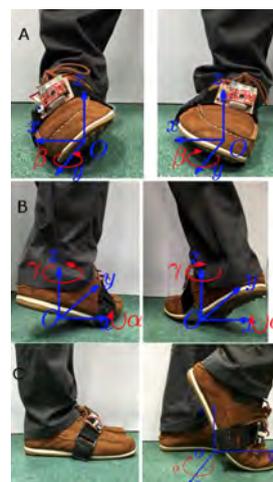
Le contrôle par le pied se fait par une unité gyroscopique attachée à la chaussure, permettant de mesurer l'orientation du pied en temps réel ; ce module communique par bluetooth avec le module de contrôle du robot. En inversant ou en éversant le pied, on choisit l'articulation que l'on souhaite activer ; puis en bougeant le talon à droite et à gauche, on fait bouger en conséquence l'articulation sélectionnée préalablement. Un mouvement d'élévation rapide du talon allume ou éteint le contrôle. Ces mouvements sont représentés en Figure 4.18b. Ce système permet ainsi de libérer les mains du chirurgien pour le contrôle de l'endoscope, à la différence des systèmes contrôlés par joysticks.

Ce système a été testé en laboratoire d'anatomie sur 5 cadavres [73], avec réalisation de méatotomies moyennes, ethmoïdectomies totales et sphénoïdotomies. La courbe d'apprentissage était considérée comme courte pour le contrôle par le pied, sans plus de précision sur cette durée d'apprentissage. Les chirurgiens ne déclaraient pas de problème à passer deux instruments en plus de l'endoscope par une seule narine pour effectuer ces chirurgies.

On peut également citer certaines études de robot plus spécifiquement dédiés à la neu-



(a) Architecture du robot en série FREE.



(b) Contrôle par mouvements du pied. A. Inversion ou éversion du pied pour sélectionner l’articulation active. B. Mouvements à droite ou à gauche, talon levé de plus de 15° , pour mobiliser l’articulation sélectionnée. C. Talon levé rapidement pour allumer ou éteindre.

FIGURE 4.18 – Robot FREE, porte-endoscope pour la chirurgie endonasale [27].

rochirurgie par voie endonasale. Cabuk et al [74] ont étudié un système porte-endoscope avec plate-forme de Stewart, pour la chirurgie transsphénoïdale. Le contrôle par joystick était cependant une limite partagée par beaucoup d’auteurs, car cela implique la présence d’un(e) assistant(e) pour contrôler le robot, avec une excellente coordination avec le premier chirurgien.

Plus récemment, le système BEAR (Brescia Endoscope Assistant Robotic Holder) a été décrit par une équipe de l’université de Brescia pour la neurochirurgie par voie endonasale [75]. Utilisé à un stade pré-clinique, ce prototype combine un robot industriel pour maintenir l’endoscope, et un contrôle par la position de la tête du chirurgien à l’aide de capteurs Microsoft Kinect 2.0. Cependant, comme pour tout système utilisant un robot industriel, les auteurs soulignaient les dimensions non optimales du robot, l’inertie excessive du système et les mouvements des articulations parfois non adaptés à l’anatomie.

Enfin, l’équipe de Friedrich et al a publié en 2017 un système porte-endoscope dédié à la chirurgie endonasale et chirurgie de la base du crâne [76]. Ce système utilise le bras de positionnement de la société Medineering. Ce bras de positionnement a obtenu un marquage CE en 2017 pour tenir et positionner des adaptateurs passifs et des robots

en ORL, neurochirurgie et chirurgie rachidienne. Ce bras de positionnement présente 4 segments en série, et 7 DDL. Le poids de charge maximum est 2 kg, pour un poids du système de moins de 10 kg. Le bras peut être bloqué dans n'importe quelle position, et des lumières LED au niveau des articulations renseignent l'opérateur sur le statut bloqué ou non du bras. A l'extrémité, une main robotique avec 5 DDL est montée sur le bras Medineering, et permet de mobiliser l'endoscope. Le système est alors appelé Endoscope Robot, représenté en Figure 4.19A. Des endoscopes standards de 4 mm peuvent être connectés. Le robot est directement attaché à la table d'opération. Le système est contrôlé par une pédale spécifique, avec joystick inclus (Figure 4.19B). Un bouton sur la pédale permet de revenir à la position de départ. L'opérateur peut choisir entre des mouvements de translations ou des rotations autour du point pivot.

L'Endoscope Robot a tout d'abord été étudié à un stade pré-clinique pour la chirurgie endonasale [76] sur un cadavre. La visualisation de tous les sinus, dont le sinus frontal, et la base du crâne était réalisable.

Ce système a ensuite été étudié à un stade clinique :

- en 2019, dans le cadre de décompressions orbitaires par voie endonasale [77], sur 8 patients. Le chirurgien était alors capable d'opérer avec ses deux mains simultanément. La mise en place du robot en début de procédure durait en moyenne moins de 10 minutes, et le temps opératoire n'était ensuite pas augmenté. Aucune complication n'était reportée.
- en 2020, sur 2 patients pour des dacryo-cysto-rhinostomies [28], dans le cadre de sténoses du canal lacrymo-nasal (Figure 4.19C). Bien que le nombre de patients soit faible, l'utilisation du robot s'est faite pendant l'ensemble des procédures et sans complication.

Ce robot semble être à ce jour le plus avancé techniquement pour une utilisation clinique en chirurgie endonasale. Les auteurs soulignent l'utilité d'ajouter un système d'irrigation pour nettoyer l'endoscope, afin d'éviter de devoir retirer le système entier lorsqu'il est souillé [76, 28]. Par ailleurs, aucune étude ne présente une analyse cinématique de ce robot, de sa précision ou de son espace de travail. Il est donc difficile de savoir s'il pourrait être adapté à d'autres types de chirurgies endoscopiques comme l'oto-endoscopie par exemple.

Jusqu'à présent, seuls l'Endofix Exo et l'Endoscope Robot ont atteint un niveau clinique, et peuvent être utilisés en salle d'opération pour évaluer leur efficacité.

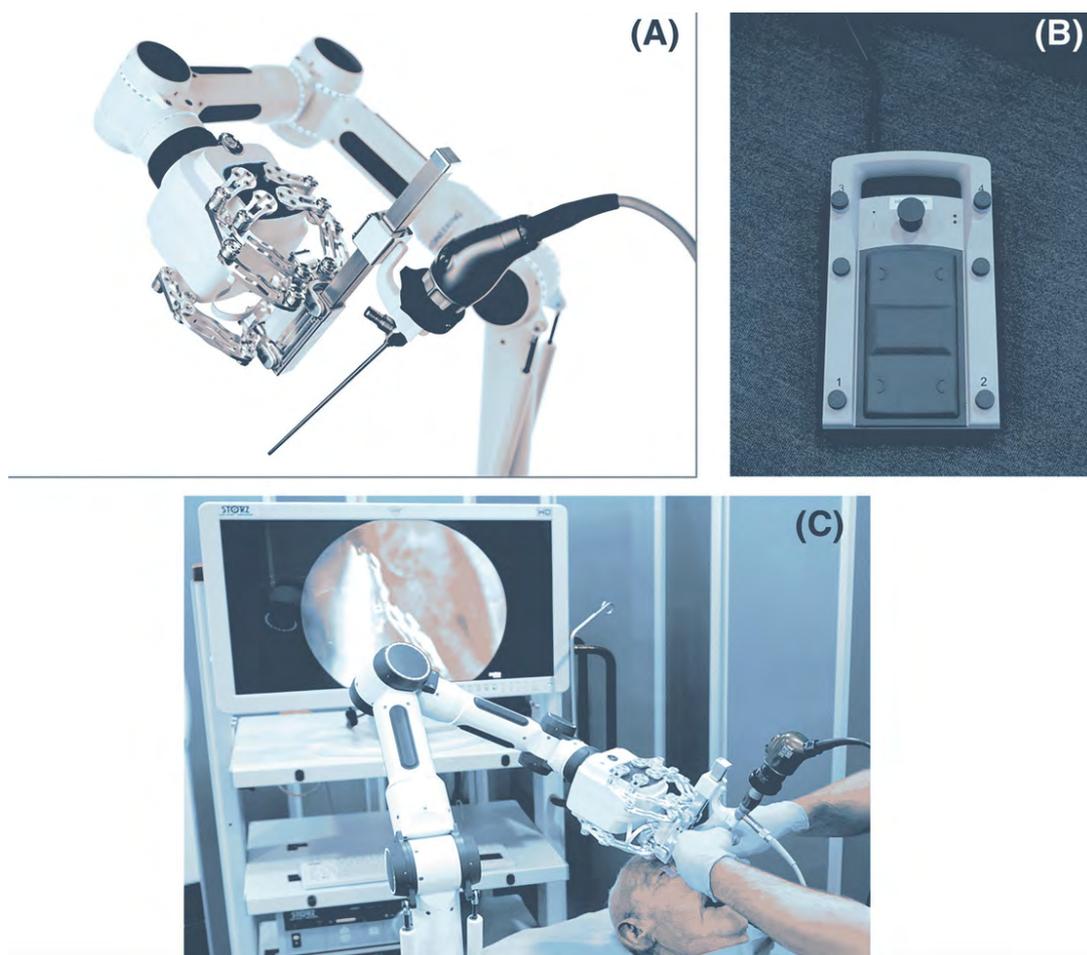


FIGURE 4.19 – Endoscope Robot, de la société Medineering, (A) Vue du système porte endoscope, adapté sur le bras de positionnement, (B) Pédale de contrôle, avec joystick situé dans sa partie supérieure, (C) Chirurgie endonasale à deux mains assistée par le robot porte-endoscope [28].