

Robots manipulateurs en chirurgie endonasale

Certains robots ont été conçus pour réaliser une tâche spécifique à la place du chirurgien dans le domaine de la chirurgie endonasale.

En 2003, Wurm [78] exposa un système robotique automatisé permettant d'accéder au sinus sphénoïdal. Un scanner pré-opératoire était réalisé pour planifier la trajectoire voulue sur un logiciel. Un outil associait l'endoscope et trois canaux additionnels à l'extrémité, afin de fraiser, aspirer et nettoyer. Cet outil était ensuite connecté à un robot industriel RV-1a Mitsubishi, architecture en série à 6 DDL. Testé sur 5 sujets anatomiques en laboratoire, il n'a pas bénéficié d'autres avancées à un stade pré-clinique.

Un endoscope flexible maintenu par un mécanisme à 3 DDL a été présenté par une équipe coréenne [29] pour la chirurgie du sinus maxillaire. Ce système est composé de 4 modules : un endoscope, un outil pour biopsie, un module de translation et un module d'actionnement. L'endoscope et la pince à biopsie présentaient chacun 4 DDL, contrôlés par deux joysticks. Ce système n'a été testé que sur un modèle en résine. On peut s'interroger sur la demande clinique d'un robot dédié spécifiquement à la chirurgie du sinus maxillaire, pourtant techniquement la plus accessible.

Une équipe de l'université de Boston [10] a conçu un système permettant de téléopérer à deux mains en chirurgie endonasale. Il s'agissait d'un robot continu à tubes concentriques, formant deux canules contrôlées à distance par deux interfaces haptiques (Figure 4.21). Une pince flexible passait par le tunnel central du tube, actionné par deux tendons. Le contrôle se faisait par deux interfaces Phantom Omni. Un endoscope conventionnel était simplement fixé sur un bras articulé passif. Cette technologie permet de donner aux instruments des formes complexes pour atteindre la cible. Ce système permettrait donc d'atteindre des zones difficiles d'accès ; cependant, il n'a été testé que sur cadavre pour le moment, dans la chirurgie de l'hypophyse par voie endonasale.

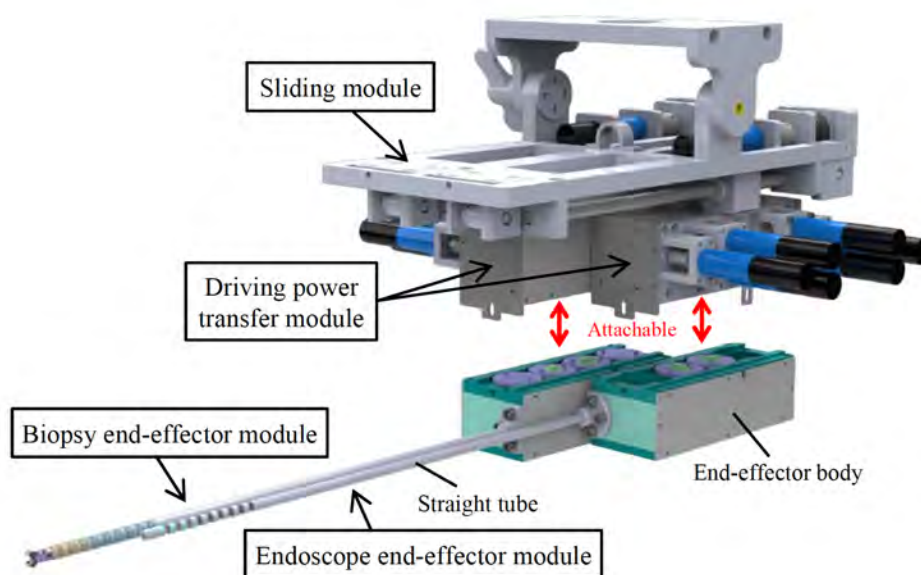


FIGURE 4.20 – Robot dédié à la chirurgie du sinus maxillaire, associant endoscope et pince à biopsie [29].

Pour le moment, aucun robot manipulateur en chirurgie endonasale n'a atteint le stade clinique. Peut-être cette situation est-elle attribuable à la faible demande clinique dans cette application spécifique, en comparaison avec les robots porte-endoscope.

Parmi ces robots étudiés pour la chirurgie endonasale, la plupart ont été conçus pour un usage porte-endoscope.

Le tableau 4.2 résume les différents robots étudiés pour la chirurgie endonasale.

4.2.3 Synthèse de la revue de la littérature

Dans cette revue de la littérature, nous avons établi une classification des robots étudiés pour la chirurgie otologique et sinusienne, en fonction de leurs applications cliniques. De nombreux robots ont été étudiés, avec des approches très variées en terme d'applications, de contrôle ou de cinématique. Mais actuellement, très peu ont atteint un stade clinique en obtenant le marquage CE.

En chirurgie otologique, beaucoup de robots sont dédiés à l'implantation cochléaire. Mais seul le Robotol, avec son bras additionnel, est capable d'assister le chirurgien durant une chirurgie oto-endoscopique.

A l'inverse, en chirurgie endonasale, beaucoup de robots ont été étudiés pour le main-

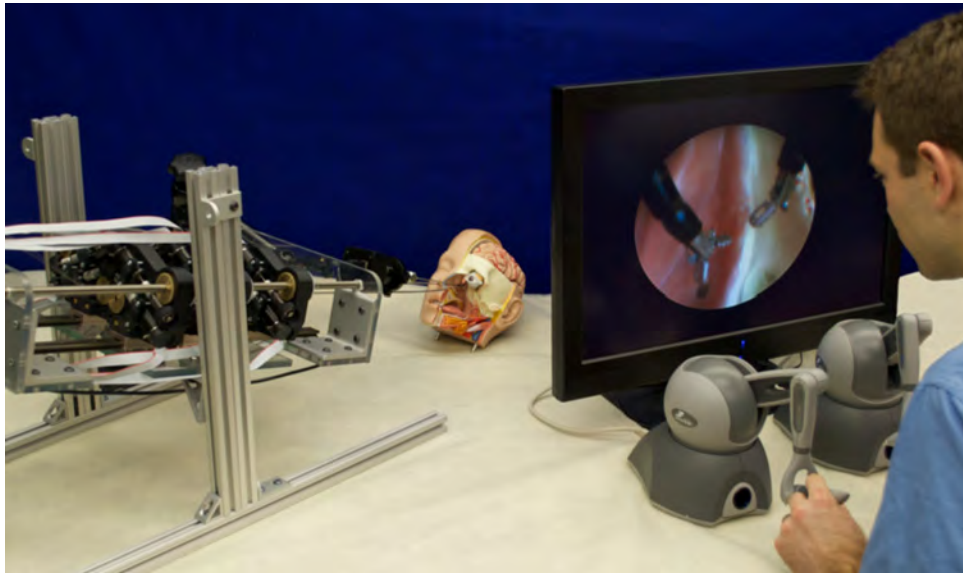


FIGURE 4.21 – Robot à deux canules actives pour la chirurgie de la base du crâne par voie endonasale, contrôlé par deux interfaces haptiques [10].

tien de l'endoscope. Deux d'entre eux ont atteint un stade clinique : l'Endofix Exo et l'Endoscope Robot. Pourtant, seul l'Endoscope Robot permet de libérer complètement les mains du chirurgien lors du contrôle de l'endoscope, grâce à une commande par le pied.

A date, aucun robot porte-endoscope ne permet de passer de la chirurgie oto-endoscopique à la chirurgie sinusienne. Il paraît pourtant intéressant de partager le même robot pour toutes les procédures endoscopiques en chirurgie ORL voire en neurochirurgie. Cela éviterait par exemple à une structure de soins de multiplier les achats de robots et les formations associées. Une voie d'amélioration est également de dissocier totalement le contrôle du robot et la main du chirurgien, et d'incorporer une navigation en réalité augmentée afin d'accroître la sécurité du geste chirurgical.

4.3 Analyse fonctionnelle

Nous avons vu dans la partie précédente (4.2) de nombreux robots conçus pour la chirurgie sinusienne ou otologique. Certains ont été étudiés pour une fonction porte-endoscope. Mais aucun, à ce jour, n'a été conçu pour une application commune à ces deux régions anatomiques.

L'objectif de cette partie est donc de réaliser une analyse fonctionnelle permettant de

Robots porte-endoscope	Robots manipulateurs en chirurgie endonasale
Robot Koseki et al. [25] 4.14	Robot Wurm et al. (<i>trajectoire pré-définie vers le sinus sphénoïdal</i>) [78]
AESOP [72]	Robot Yoon et al. (<i>biopsies sinus maxillaire</i>) [29] 4.20
Robot Fisher et al. [26] 4.15	Robot Burgner et al. (<i>contrôle haptique</i>) [10] 4.21
SurgiDelta [13] 4.16	
HYBRID [12] 4.17b	
<u>Endofix Exo</u> [67] 4.12	
Robot Cabuk et al. [74]	
BEAR [75]	
<u>Endoscope Robot</u> [76] 4.19	

TABLE 4.2 – Tableau récapitulatif des différents robots étudiés pour la chirurgie endonasale (les robots ayant un marquage CE sont soulignés).

dégager les fonctions que notre robot devra remplir, et quelles contraintes il devra respecter. Cette analyse permettra également de s’interroger sur les modalités de fixation ou de contrôle. Plusieurs possibilités d’architecture sont évoquées pour remplir ces fonctions.

4.3.1 Analyse fonctionnelle externe

Ce travail d’analyse fonctionnelle externe a été réalisé avec Pierre Schegg et Félix Péchereau, en mars 2018, puis présenté au Congrès Français de Mécanique à Brest en Août 2019 [79].

4.3.1.1 Diagramme bête à corne

L’objectif est de concevoir un système robotisé permettant d’assister le chirurgien à l’aide d’une troisième main, portant l’endoscope. Celle-ci permettrait de faciliter l’utilisation de l’endoscope en chirurgie otologique ou sinusienne, voire en neurochirurgie.

Outre les problématiques de sécurité pour l’équipe et le patient, ce système robotique doit rendre le temps de manipulation/déplacement/positionnement de l’endoscope aussi court que possible.

Ce diagramme est représenté Figure 4.22.

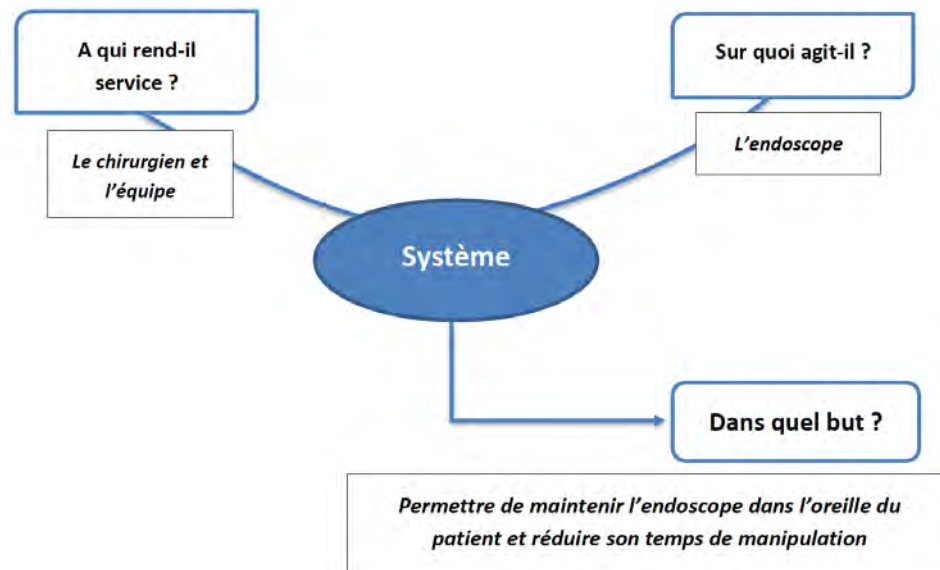


FIGURE 4.22 – Diagramme tête à corne

4.3.1.2 Diagramme pieuvre

Ce diagramme met en évidence les relations entre les différents éléments du milieu environnant et le produit. Ces différentes relations sont appelées les fonctions de service qui conduisent à la satisfaction du besoin.

Ce diagramme, représenté Figure 4.23, regroupe les relations suivants :

- le chirurgien et l'interne : manipulent le système pour placer l'endoscope dans l'oreille du patient.
- le patient : au sein duquel agit le système. Ce pôle du diagramme pieuvre fournit des informations sur la géométrie dans laquelle l'endoscope doit évoluer (i.e. l'espace de travail du système), les contraintes mécaniques à respecter pour ne pas blesser le patient, et les cas d'usages/scénarios typiques d'utilisation d'un endoscope en fonction des diverses pathologies.
- l'endoscope : le plus souvent de diamètres 3 mm, d'inclinaison de 0°, 30° voire 45° et 70°. L'endoscope est relié à une caméra qui renvoie sur un écran les images perçues dans le site opératoire.
- les infirmiers/ères de bloc, aide-soignant(e)s et agents de service des hôpitaux (ASH) : peuvent être en contact avec le système pour la mise en place dans le bloc avant opération, d'éventuels réglages en cours de chirurgie, et le nettoyage et

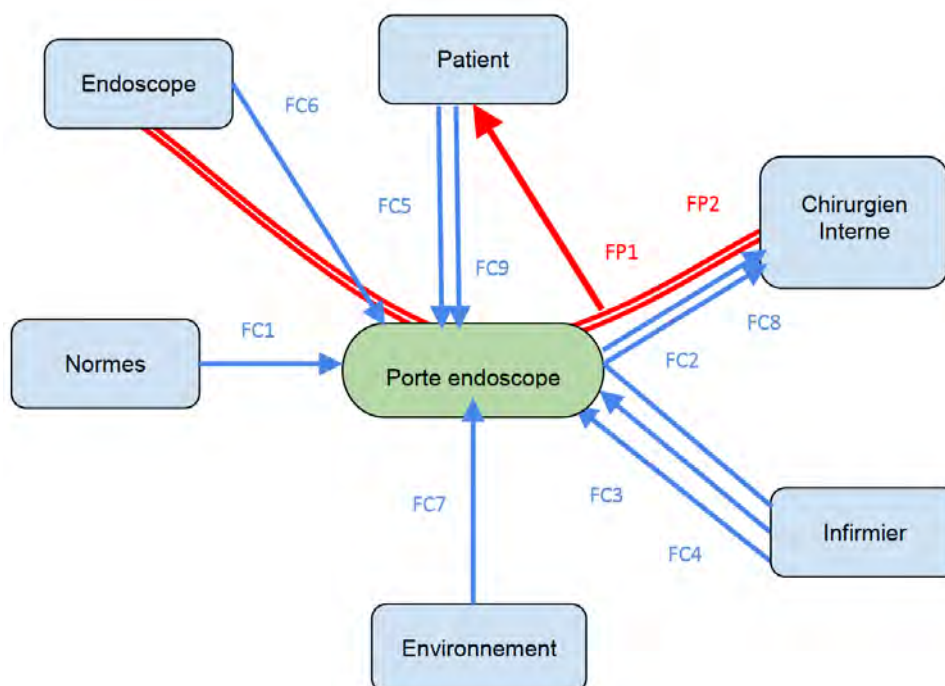


FIGURE 4.23 – Diagramme pieuvre définissant les interactions du système.

stockage du système après chirurgie.

- le cadre normatif : normes médico-légales régissant l'utilisation de robots chirurgicaux.
- le milieu environnant (bloc opératoire) : regroupe le volume disponible dans une salle de bloc et les outils déjà présents (matériel d'anesthésie, microscope, scialytiques, ...).

4.3.1.3 Fonctions du système

Les fonctions principales et les fonctions contraintes sont ensuite listées dans le cadre de cette analyse. Elles sont représentées en Figure 4.24.

Certains auteurs ont ajouté d'autres pré-requis pour un robot porte endoscope, que l'on peut ajouter aux fonctions de notre système. Ainsi, Eichhorn [11] définit comme fonctions contraintes :

- l'extrémité de l'instrument doit toujours être au centre de la vue endoscopique,
- le chirurgien doit avoir assez de place pour passer ses instruments,

Fonctions Principales	
FP1	Permettre au chirurgien de positionner et maintenir l'endoscope dans l'oreille du patient
FP2	Réduire le temps que passe le chirurgien à déplacer/manipuler l'endoscope pendant l'opération
Fonctions Contraintes	
FC1	Respecter toutes les normes médico-légales
FC2	Permettre la comanipulation de l'endoscope
FC3	Être facilement transportable/manipulable par le personnel
FC4	Garantir la stérilité du matériel pendant l'opération
FC5	Empêcher toute blessure du patient pendant l'opération en toutes circonstances : déroulement normal, toux (déplacement faible, à dimensionner)
FC6	Permettre de porter n'importe quel modèle d'endoscope utilisé en chirurgie otologique
FC7	Pouvoir s'installer dans n'importe quel bloc opératoire (éviter d'être bloc dépendant)
FC8	Être aussi intuitif et simple à contrôler que possible, durant l'opération
FC9	Doit empêcher toute blessure du patient en cas de réveil (déplacement important, à dimensionner)

FIGURE 4.24 – Tableau des fonctions principales et contraintes définies pour le robot.

- le robot peut automatiquement nettoyer l’endoscope,
- le chirurgien peut diriger le robot pour des localisations précises.

4.3.2 Proposition de solutions

A la suite de cette analyse fonctionnelle, deux questions se posent : comment fixer le porte-endoscope et comment le contrôler.

4.3.2.1 Analyse des différentes modalités de fixation

Plusieurs modalités de fixation ont été envisagées.

4.3.2.1.a Au sol

Inspiré de l’état en l’art en laparoscopie, le robot peut être positionné sur un chariot roulant au sol. L’avantage est d’être mobile et aisé à transporter entre les salles de bloc. Ce type de fixation est fréquent en salle d’intervention, comme c’est déjà le cas pour le microscope par exemple.

Cependant, cela majore l’encombrement, et réduit l’espace de travail autour du patient. Par ailleurs, cela nécessite une plus grande raideur entre le chariot et le sol, ce qui implique a priori un système plus lourd et volumineux.

4.3.2.1.b Au plafond

La base du robot serait déportée au plafond, ce qui permet de libérer l’espace au sol, comme pour les scialytiques par exemple. Cela permet une plus grande liberté de mouvement par rapport au patient, et libère de l’espace de travail.

Cependant, cela contraint le système à n’être utilisé que dans une salle de bloc dédiée, ce qui peut être un problème dans certaines structures de soin. Par ailleurs, le placement est incertain au niveau des points d’attache au plafond par rapport à la table d’opération selon les salles de bloc, et cela rend plus difficile le dimensionnement et l’optimisation de l’espace de travail du robot.

4.3.2.1.c A la table d’opération

Inspiré du porte spéculum passif utilisé en otologie, ce système comporterait une fixation sur les rails placés de part et d’autre des tables d’opération. Cela permet un

positionnement au plus près de l'espace de travail, et un dimensionnement du robot plus petit.

Cependant, il faut être capable de limiter le volume du robot porte-endoscope.

4.3.2.1.d Sur le patient

Il est également possible de venir fixer le robot porte-endoscope directement sur le patient. Cela a l'avantage de minimiser la taille du robot.

En revanche, la limite réside dans l'important encombrement de la place autour de l'espace de travail, déjà restreint, et probablement peu adapté à la chirurgie otologique ou sinusienne.

4.3.2.1.e Sur le chirurgien

Certains dispositifs sont directement positionnés sur le chirurgien, comme les casques par exemple. Cela libère de l'espace et rend le positionnement plus intuitif.

Cependant, le robot, de par son poids, peut devenir trop lourd et gênant lors d'interventions durant souvent de 2 à 3 heures.

4.3.2.1.f Synthèse des possibilités de fixation

D'après les différentes possibilités évoquées précédemment, les choix les plus adaptés à la chirurgie otologique paraissent être la fixation sur rail de table d'opération, ou au sol. Ces deux modalités de fixation permettent de respecter la fonction contrainte FC7 définie en 4.24 (*pouvoir s'adapter à n'importe quel bloc opératoire*), à la différence d'une attache au plafond. Une fixation à la table d'opération permettrait de minimiser la taille et la masse du robot, par rapport à la fixation au sol.

Nous rejetons a priori les solutions suivantes : fixation sur le patient, car prenant de la place sur la zone opératoire ; fixation sur le chirurgien, considérée comme trop lourde et contraignante lors d'une chirurgie longue.

Le choix final peut se faire en fonction de l'architecture du robot mais aussi en fonction de la complexité de la fixation ou de la nécessité de libérer de l'espace autour du patient pendant l'intervention.

4.3.2.2 Analyse des différentes modalités de contrôle

Pour réduire le temps de manipulation, il est nécessaire de définir les modalités de contrôle du robot porte-endoscope.

Ce choix dépend de facteurs techniques, humains et éthiques. Plusieurs modalités peuvent être envisagées.

4.3.2.2.a Commande vocale

Le chirurgien prononce des commandes préconçues, par exemple “*Tourner 45 degrés X*”. Cela permet au chirurgien de ne pas utiliser de matériel supplémentaire et de conserver mains et pieds libres pour d’autres fonctions.

Cependant, cela demande une phase d’apprentissage, et ces commandes peuvent entrer en conflit avec le dialogue entre le chirurgien et le personnel du bloc pendant l’opération. Cela nécessiterait donc l’utilisation d’une pédale d’activation, ce qui limite l’avantage a priori de cette méthode. Par ailleurs, il peut être difficile de préciser verbalement les amplitudes ou directions précises demandées au robot.

4.3.2.2.b Manipulation par une tierce personne

Une tierce personne, comme un(e) interne ou un(e) infirmier(ère) de bloc opératoire par exemple, manipule le porte-endoscope.

Cependant, tout comme lors de la commande vocale, il peut être difficile, dans un espace restreint et anatomiquement complexe, de préciser à l’aide opératoire les directions précises voulues pour la manipulation du robot. Par ailleurs, cela nécessite une personne supplémentaire disponible durant toute la durée de l’opération, ce qui n’est pas possible dans toutes les structures de soins.

4.3.2.2.c Contrôle à l’aide d’une pédale ou d’un joystick

Si le chirurgien utilise un système de pédales pour guider les différentes mobilités du robot, ses mains restent libres pour effectuer l’opération. En utilisant le pied gauche comme le pied droit, l’endoscope peut être orienté à sa guise tout au long de l’opération.

Si le chirurgien utilise un joystick, il est obligé d’abandonner une main pour déplacer l’endoscope. Cela est réalisable s’il ne change pas trop souvent l’endoscope de position.

Ces systèmes, par pédale ou par joystick, ont l’avantage d’être simples et intuitifs à mettre en place. Cependant, leur choix diminue un des objectifs principaux du robot,

visant à libérer les mains du chirurgien pendant l'opération.

Au niveau des pieds, il existe déjà de multiples commandes qui limitent l'utilisation d'une pédale supplémentaire : deux à trois pédales sont déjà présentes au pied du chirurgien (aspiration, coagulation et parfois moteur sont actionnés au pied lors d'une chirurgie otologique ; nettoyage, coagulation et parfois moteur lors d'une chirurgie endonasale).

4.3.2.2.d Contrôle par mouvement de la tête

Une solution pourrait consister à équiper le chirurgien d'un casque comportant des accéléromètres. Le chirurgien peut alors contrôler le robot en déplaçant sa tête.

Cependant, ce type de contrôle reste peu précis dans la gestion de la position et de la vitesse, et demande une longue phase d'apprentissage. A noter que le développement d'un tel dispositif est également coûteux.

4.3.2.2.e Utilisation d'un mode transparent

Le robot détecte quand un humain le manipule et passe alors en mode transparent, c'est-à-dire qu'il suit les mouvements qui lui sont imposés par l'humain et reste en position lorsqu'il perd le contact.

Ce système est très simple et intuitif. Cependant, il nécessite la main du chirurgien ou de son assistant, et renvoie donc aux limites évoquées lors du contrôle par joystick.

4.3.2.2.f Suivi d'un instrument chirurgical

Le robot utilise des algorithmes de vision pour détecter et suivre un outil. On peut imaginer définir un tracking de l'aspiration, instrument le plus souvent présent dans le champ de vision de l'endoscope. Les autres instruments (pinces, ciseaux, ...) sont souvent utilisés alternativement par le chirurgien, ce qui limite la possibilité de les suivre.

Ce système serait intuitif et libérerait les mains du chirurgien. Cependant, il faut pouvoir activer ou désactiver le suivi selon les situations : lorsque le chirurgien ne souhaite pas de mouvement du robot ; lorsque l'outil suivi sort du champ de vision, ...

4.3.2.2.g Synthèse des possibilités de contrôle

Le choix de la solution de contrôle la plus adaptée aux fonctions énoncées en 4.3.1.3 serait le suivi d'un instrument chirurgical. Cependant, cette modalité de contrôle devrait être couplée au mode transparent pour le positionnement macroscopique du robot.

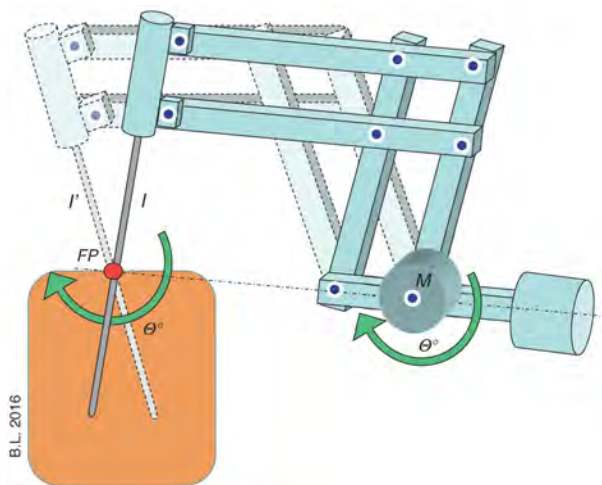


FIGURE 4.25 – Mécanisme avec centre de rotation déporté, basé sur une structure parallélogramme. Le mouvement du moteur (M) est transmis exactement à l'outil (I) au niveau du centre virtuel (FP), permettant de repousser le système à distance du patient [13].

Nous ne retenons pas a priori les solutions suivantes : contrôle par commande vocale, car la commande peut entrer en conflit avec d'autres instructions avec le personnel de bloc ; contrôle à l'aide d'une pédale, car il existe déjà plusieurs pédales au pied du chirurgien, limitant l'ajout d'une commande supplémentaire ; commande à l'aide d'un joystick, car limitant la fonction du robot de libérer une main du chirurgien.

4.3.2.3 Analyse des différentes architectures

4.3.2.3.a Principe du RCM

Les centres de rotation déportés ou Remote Center of Motion RCM proposent une solution aux contraintes liées à la chirurgie mini-invasive [13].

En effet, cette chirurgie vise à atteindre les structures anatomiques à travers les orifices naturels (méat acoustique externe, narines, ...) ou à travers la plus petite incision possible. Ainsi, des mécanismes avec RCM, tels qu'en Figure 4.25, permettent d'éloigner les articulations du point de rotation virtuel, i.e. de l'orifice d'entrée où s'insère l'outil, et de répondre aux exigences de la chirurgie mini-invasive [80].

Un avantage de ces systèmes est que leur structure est intrinsèquement sûre [80]. En effet, puisque leur cinématique ne leur permet pas de se mouvoir autour du centre de rotation virtuel, le risque de lésions du patient est minimisé par rapport à des structures

où le point pivot résulte de la combinaison de plusieurs mouvements [13]. L'inconvénient de ces systèmes est que ce point virtuel dépend de la position du robot.

La plupart des mécanismes avec RCM utilisés dans des applications médicales ont des parallélogrammes et deux actionneurs rotatifs en série pour les mouvements de rotation (Figure 4.25).

Le robot chirurgical *da Vinci* utilise ainsi un parallélogramme pour déplacer le centre de la liaison sphérique, représenté en Figure 4.26, à partir du brevet de cette technologie [81].

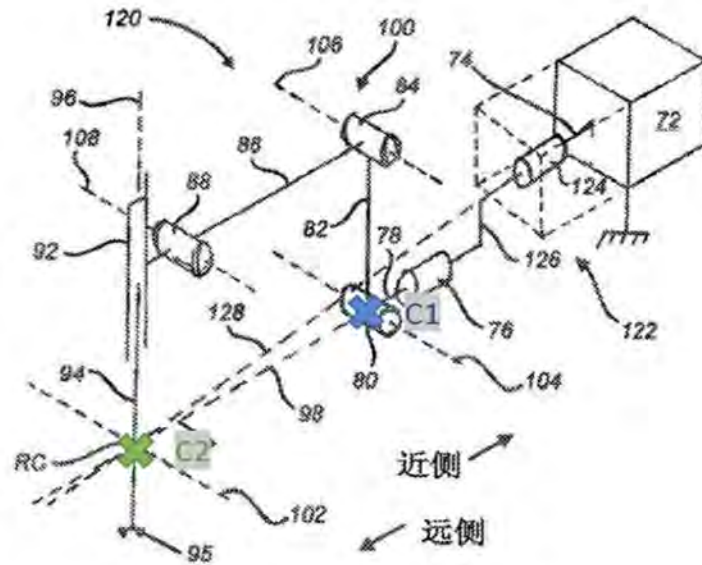


FIGURE 4.26 – Architecture du robot Da Vinci, Intuitive Surgical Inc.

Ce système de parallélogramme permet de déporter au maximum les éléments volumineux loin de la tête du patient et ainsi dégager un maximum d'espace pour permettre au chirurgien de travailler.

4.3.2.3.b Architectures sérielles

Les architectures sérielles sont très utilisées dans la conception de robots de chirurgie mini-invasive, représentant 61 % des systèmes de cette catégorie [82].

Pour obtenir les mobilités désirées, on pourrait en théorie se permettre de choisir n'importe quelle architecture constituée de trois liaisons pivots non colinéaires et une prismatique selon l'axe x. Instinctivement, on pense imposer la dernière liaison (c'est-à-

dire la liaison portant l’endoscope) comme étant une liaison prismatique, afin de réaliser la fonction de sécurité en cas de retrait rapide de l’oreille du patient.

De plus, on se base sur le principe du RCM pour dégager au maximum l’espace de travail du chirurgien [30]. Un exemple de structure issue de ce travail avec les mobilités adaptées est présenté en Figure 4.27.

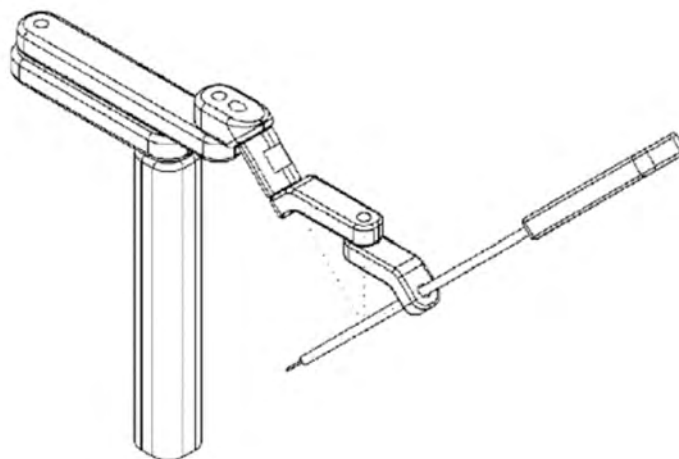


FIGURE 4.27 – Structure robotique *Curved RCM Robot Arm*

On peut voir sur cette figure que les 3 articulations pivots permettent la création du RCM, et on peut même imaginer pouvoir paramétrer leur angle d’inclinaison pour régler à notre guise sa position.

Cependant cette modélisation ne prend en compte que la cinématique du robot et il faut également penser à l’actionnement d’un bras sériel ; il faut en effet ajouter un actionneur par articulation, ce qui crée une excroissance sur le bras et un volume plus important.

On rejette donc à priori cette conception car l’espace disponible pour le chirurgien serait trop encombré avec un poignet sériel.

4.3.2.3.c Architectures parallèles

Les architectures parallèles permettent d’obtenir une haute rigidité et une bonne précision, ce qui en fait d’excellents choix pour une application chirurgicale [13]. De plus, leur structure leur permet de supporter un poids supérieur que les manipulateurs sériels, car chaque moteur collabore avec les autres pour cumuler leurs forces, puisqu’ils agissent

en circuit fermé. Cela permet par exemple de diminuer la puissance de chaque moteur, et donc d'obtenir un robot à la fois plus petit et plus sûr [83].

On pourrait ainsi, dans notre travail, réaliser un RCM grâce à une architecture parallèle, en travaillant sur les travaux de Aksungur [30] et Li [84]. L'exemple présenté en Figure 4.28 posséderait les degrés de libertés nécessaires pour une chirurgie de l'oreille ou des sinus.

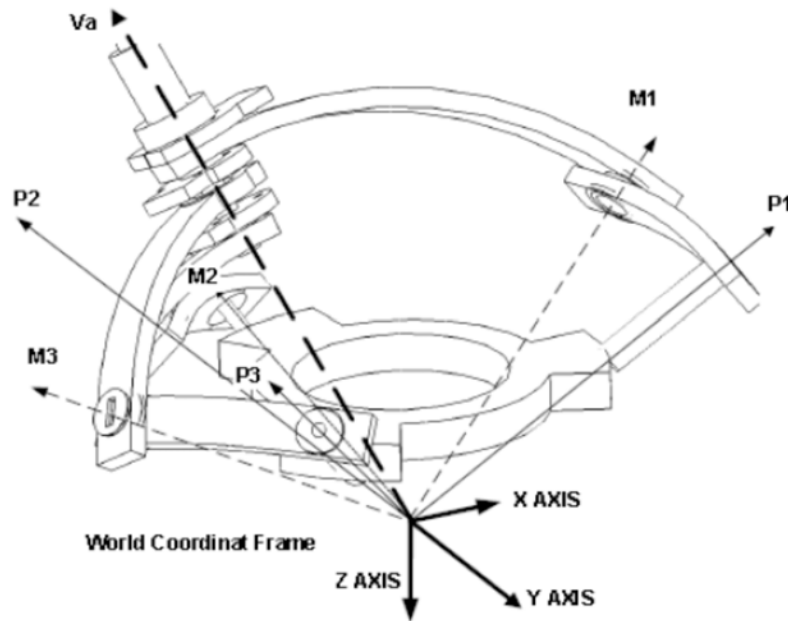


FIGURE 4.28 – Schéma d'une plate-forme sphérique issue de la chirurgie laparoscopique [30]

Cependant, on peut ici faire la même réflexion que pour la version sérielle sur l'encombrement que prendrait un tel système, mais il présente l'avantage de pouvoir déporter l'actionnement sur la base du mécanisme.

Une possibilité alternative serait de reprendre la conception de zéro en utilisant la théorie des torseurs et d'intégrer un RCM dans cette conception, d'après le travail de Kong et Gosselin [85].

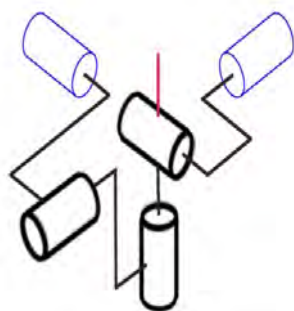
Nous voulons en effet une structure 3R1P et recherchons 4 degrés de libertés, ce qui impose de motoriser les 4 liaisons. L'architecture proposée par Kong et Gosselin est un 4-RRRP, c'est à dire 4 jambes d'architecture identique : 3 liaisons pivots d'axes concourants créant ainsi le RCM puis une prismatique.

Pour des raisons d'encombrement que nécessite une structure parallèle, nous préférons

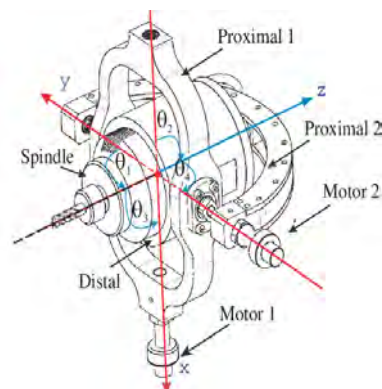
nous concentrer sur une solution moins encombrante permettant de déporter la masse ailleurs sur la structure et envisager une architecture qui nous paraît plus adaptée.

4.3.2.3.d Oeil agile

L'oeil agile a été conçu pour mouvoir une caméra très rapidement avec trois types de rotations. Il a été décrit par Gosselin et al initialement [86], puis modifié avec une version à deux degrés de rotations [87]. On retrouve deux chaînes en série, composées d'articulations pivots, dont leurs axes se recoupent en un seul point. Elles sont connectées afin de contraindre l'orientation du vecteur V , vecteur illustré en rouge en Figure 4.29a. Une modification de ce mécanisme, le poignet Orthoglide, a ensuite été décrit [88]. Le centre de rotation est à l'intersection de deux moteurs, comme représenté en Figure 4.29b.



(a) Schéma de l'oeil agile, mécanisme sphérique à deux degrés de libertés.

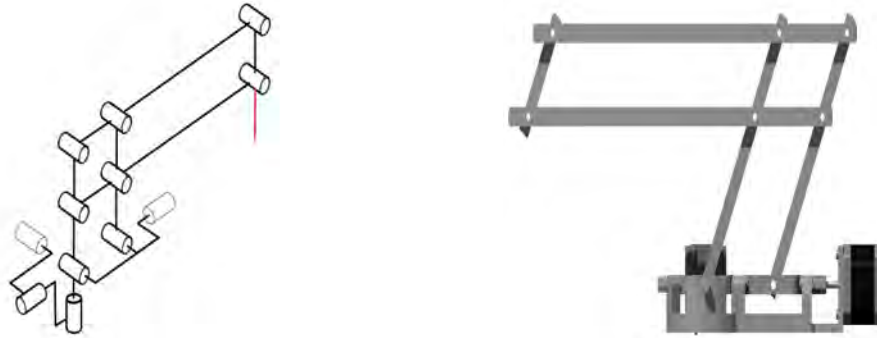


(b) Poignet Orthoglide [88]

L'avantage de ce système est la robustesse de sa construction et la précision de sa cinématique grâce à la boucle en circuit fermé. Un inconvénient de ce système est que l'effecteur (comme l'endoscope) doit être positionné de manière à ce que le point d'intérêt de l'effecteur coïncide avec le centre de rotation déporté.

L'oeil agile à deux degrés de libertés a ensuite été présenté avec un offset, c'est-à-dire un déport [89]. Ce mécanisme présente la même construction que celui précédemment décrit [87], mais le centre de rotation déporté est déplacé en utilisant un parallélogramme, comme présenté en Figure 4.30a. Le déplacement maximal de l'articulation des actionneurs est de 60° comme indiqué sur la Figure 4.30b.

L'avantage de ce mécanisme est que le centre de rotation déporté peut être déplacé selon les exigences de l'opérateur. Cela aide à placer les moteurs au niveau de la base, et à manipuler l'endoscope à distance. Cependant, cela conduit à une analyse cinématique plus



(a) Schéma du mécanisme de l'oeil agile avec un offset (b) Mécanisme de l'oeil agile avec une inclinaison de 60°

FIGURE 4.30 – Détails de l'oeil agile à deux degrés de libertés avec un offset [31].

complexe car les propriétés de la structure du parallélogramme affectent également les performances globales. L'étude de la rigidité est également primordiale pour ce mécanisme, puisque la charge de l'endoscope s'applique à l'extrémité des tiges du parallélogramme, pouvant entraîner des phénomènes d'inflexion.

4.3.2.3.e Synthèse des catégories d'architecture

Nous avons vu dans cette section plusieurs catégories d'architecture qui pourraient être adaptées à notre système de porte-endoscope. Chaque solution présente des limites, qu'il faut mettre en lien avec l'analyse fonctionnelle externe réalisée précédemment, et particulièrement les fonctions contraintes du robot.

La solution d'un centre de rotation déporté afin d'éloigner l'encombrement du robot de zones anatomiques de petites tailles paraît d'emblée intéressante.

Une architecture sérielle, bien qu'elle soit très utilisée en robotique médicale, nous semble responsable d'un encombrement pouvant être gênant dans une application otologique ou sinusienne, puisque les actionneurs seraient répartis sur le bras, à chaque articulation.

Ainsi, d'après les contraintes de faible encombrement et de précision nécessaires dans ce contexte chirurgical, les architectures privilégiées à ce stade seraient l'association d'un mécanisme parallèle ou d'un oeil-agile à un parallélogramme afin de déporter le centre de rotation [31].

Une translation de l'effecteur sera de plus nécessaire pour remplir les conditions de sécurité et de nettoyage fixées dans l'analyse fonctionnelle initiale.

4.4 Veille des brevets

Afin de vérifier la pertinence de notre projet et la nécessité ou non de protection de nos données, une veille de brevets était nécessaire. Il s’agissait ainsi de rechercher les brevets déjà déposés sur des systèmes proches de celui de notre projet, ou possédant des caractéristiques similaires.

L’objectif de ce chapitre est de présenter la méthodologie de cette veille de brevets puis les résultats issus de ce travail, afin de savoir si le concept de notre robot porte-endoscope était novateur par rapport à l’existant.

Ce travail de veille de brevets a été réalisé avec Manon Dreux et Léa Ginzburg en mars 2019, et présenté au Congrès Français de Mécanique à Brest en Août 2019 [90]. Cette veille a été réactualisée en avril 2021.

4.4.1 Méthodologie de recherches de brevet

Pour réaliser cette veille de brevets, nous nous sommes intéressés au caractère public ou privé des brevets, et aux pays dans lesquels ils s’appliquent si notre étude utilise une partie d’un brevet existant. En effet, un brevet peut rester dans le domaine privé jusqu’à 20 ans après sa publication si les taxes annuelles sont bien payées. Lorsqu’un inventeur utilise tout ou partie d’un brevet toujours privé, il devra alors payer des taxes auprès de l’auteur de celui-ci. En revanche, lorsqu’un brevet tombe dans le domaine public, l’invention peut être utilisée sans démarche particulière.

Il existe différentes banques de données de brevets. Nous avons opté pour Espacenet, même si d’autres sites web offrent des services similaires comme Google Patents. Il s’agit de services gratuits regroupant des brevets du monde entier et proposant une recherche avancée où l’on peut préciser des mots clés, des numéros de publication ou encore des noms d’auteurs.

Nous avons principalement effectué deux types de recherches : par mots clés et par classification.

Les mots clés utilisés, qui sont issus du monde médical et de la robotique, étaient : RCM (*Remote Center of Motion*), poignet sphérique (*Spherical Wrist*), chirurgie robotique (*Robotic Surgery*), et parallèle (*Parallel*) pour l’architecture parallèle du robot.

La recherche par classification permet de rechercher des brevets selon leurs domaines

d'application. Il existe différents niveaux de classification : classe (*exemple : A61 - "sciences médicales ou vétérinaires ; hygiène"*), sous-classe (*exemple : A61B - "diagnostic ; chirurgie ; identification"*), groupe (*exemple : A61B34/00 - "chirurgie assistée par ordinateur ; manipulateurs ou robots spécialement adaptés à l'utilisation en chirurgie"*).

Pour notre recherche par classification, nous avons principalement utilisé :

- A61B34/70 : *Manipulateurs spécialement adaptés pour l'utilisation en chirurgie.*
- A61B34/20 : *Systèmes de navigation chirurgicale ; dispositifs de suivi ou de guidage d'instruments chirurgicaux.*
- A61B34/30 : *Robots chirurgicaux.*
- A61B1/00 : *Instruments pour l'examen médical de l'intérieur de cavités ou de tubes du corps par inspection visuelle ou photographique, exemple : endoscopes.*

Ainsi, nous avons combiné des recherches en mécanique pure et en chirurgie pour étendre au maximum nos recherches.

Nous avons mis en évidence 24 brevets semblant proche de notre domaine de recherche. Il faut bien sûr noter qu'il ne s'agit que d'un aperçu, puisqu'il existe par exemple des recherches non brevetées, dont la revue de la littérature a été réalisée précédemment (4.2), ou en cours de brevet.

4.4.2 Etat de l'art des brevets

Nous regroupons tout d'abord dans la Figure 4.31 les architectures de robots parallèles permettant de réaliser un mouvement sphérique.

Ces mécanismes peuvent être utilisés pour orienter un endoscope dans le conduit auditif externe. On remarque que ces brevets sont anciens et donc dans le domaine public. Il faut noter que le centre de rotation est soit un point virtuel, c'est-à-dire l'intersection d'axes de rotation, soit un cardan ou une rotule pour fixer le centre de rotation.

Dans la Figure 4.32 sont présentés les mécanismes avec RCM. Dans ces différents mécanismes, le centre de rotation du mouvement peut être défini de trois manières différentes :

- soit par logiciel,
- soit par des contraintes géométriques issues des intersections des axes de rotation des actionneurs,
- soit par des parallélogrammes ou une synchronisation des mouvements avec des courroies.

Chapitre 4 – Introduction d’un nouveau robot en ORL


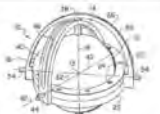
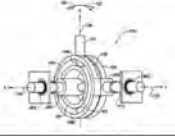

Référence brevet	Nom	Date	Image
CA2235759	TWO DEGREE-OF-FREEDOM SPHERICAL ORIENTING DEVICE	1998-10-23	
US4628765	SPHERICAL ROBOTIC WRIST JOINT	1986-12-16	
US5243873	TWO-AXIS MOTION MECHANISM	1993-09-14	
US4878393	DENTROUS SPHERICAL ROBOT WRIST	1989-11-07	

FIGURE 4.31 – Brevets de robots sphériques.

La première solution permet la génération de plusieurs types de mouvements, mais offre un degré de sécurité moindre. La deuxième solution génère un grand volume de débattement du bras pour “tourner” autour du centre de rotation. La contrepartie peut être un espace de travail réduit si l’on souhaite diminuer ce défaut. La troisième solution permet de déplacer tout ou partie de l’actionnement loin du centre de rotation. Tous ces mécanismes peuvent être utilisés pour des applications médicales, afin de porter des outils ou, plus rarement, pour faire de l’imagerie.

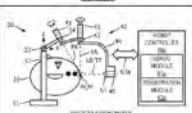
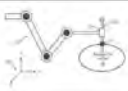
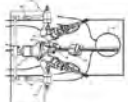


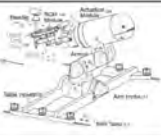



Référence brevet	Nom	Date	Image
WO2017055880	OPTICAL REGISTRATION OF A REMOTE CENTER OF MOTION ROBOT	2017-04-06	
WO2014020571	CONTROLLER DEFINITION OF A ROBOTIC REMOTE CENTER OF MOTION	2014-02-06	
US2007173977	CENTER ROBOTIC ARM WITH FIVE-BAR SPHERICAL LINKAGE FOR ENDOSCOPIC CAMERA	2007-07-26	
WO2008157225	ROBOTIC MANIPULATOR WITH REMOTE CENTER OF MOTION AND COMPACT DRIVE	2008-12-24	
FR2845889	SURGICAL ROBOT FOR GUIDING AND POSITIONING AN INSTRUMENT HAS SUPPORTING LEG WITH ROTARY BEAM WITH DRIVE, CARRIER ARM AND DEFORMABLE PARALLELOGRAMS	2004-04-23	
WO2017192796	REMOTE CENTER OF MOTION ROBOT	2017-11-09	
WO2012065058	REMOTE CENTER OF MOTION ROBOT FOR MEDICAL IMAGE SCANNING AND IMAGE-GUIDED TARGETING	2012-05-18	
CA2475239	REMOTE CENTER OF MOTION ROBOTIC SYSTEM AND METHOD	2003-08-14	
KR20090089928	CURVED RCM OF SURGICAL ROBOT ARM	2009-08-25	

FIGURE 4.32 – Brevets de robots avec centre de rotation déporté.

Les robots chirurgicaux sont présentés en Figure 4.33 ; il faut distinguer les architectures sur base mobile et les architectures fixes. Ces brevets portent soit sur le support d’outil, soit sur leur intégration complète. On peut noter dans cette figure (2e ligne) le

4.4. Veille des brevets

brevet US20070038214, déposé par la société *Intuitive Surgical Operations*, et qui est à l'origine du brevet initial utilisé dans le robot Da Vinci.


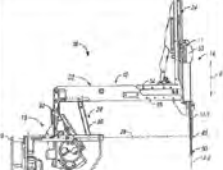



Référence brevet	Nom	Date	Image
US2014128882	SURGICAL INSTRUMENT, SUPPORT EQUIPMENT, AND SURGICAL ROBOT SYSTEM	2014-05-08	
US20070038214	MINIMALLY INVASIVE SURGICAL HOOK APPARATUS	1999-10-05	
US201719128	METHODS, SYSTEMS, AND DEVICES FOR MOVING A SURGICAL INSTRUMENT COUPLED TO A ROBOTIC SURGICAL SYSTEM	2017-07-06	
US201819021	SYSTEM AND METHOD FOR IMAGE-BASED ROBOTIC SURGERY	2014-07-03	
WO201710988	MEDICAL MANIPULATOR SYSTEM AND OPERATING METHOD THEREOF	2017-06-22	

FIGURE 4.33 – Brevets de robots chirurgicaux.

La Figure 4.34 présente une liste d'instruments chirurgicaux qui ont été montés sur des architectures robotisées avec une structure sérielle. Ces dispositifs portent en général soit un outil, soit un endoscope.

La différence essentielle entre ces différents mécanismes provient du dimensionnement de la structure ou de sa précision. Les mécanismes portant un outil ont le plus souvent un degré de précision accru, tandis que ceux portant un endoscope présentent de plus grandes amplitudes de mouvements. D'autres architectures de robots parallèles, présentées en Figure 4.34, peuvent être utilisées pour porter des outils ou des endoscopes, mais elles n'utilisent pas la notion de centre de rotation déporté.




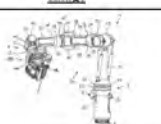


Référence brevet	Nom	Date	Image
US2018317753	ENDOSCOPIC SYSTEM AND METHOD FOR CONTROLLING THE SAME	2018-11-08	
US2013317517	DISPOSITIF D'ASSISTANCE A LA CHIRURGIE OTOLOGIQUE D'UN PATIENT A IMPLANTER AVEC UN IMPLANT COCHLEAIRE	2013-11-28	
FR3066378	INSTRUMENT CHIRURGICAL A PORTIONS DEVIÉES ET INSTALLATION ROBOTISÉE COMPORTANT UN TEL INSTRUMENT	2018-11-23	
DE102017111296	ROBOTIC MANIPULATOR FOR GUIDING AN ENDSCOPE, HAVING PARALLEL KINEMATICS	2018-08-02	
CN107363809	FOUR-DEGREE-OF-FREEDOM PARALLEL TYPE MINIMALLY INVASIVE SURGERY	2017-11-21	
WO2012013846	PARALLEL-CONFIGURATION TELEROBOTIC ARM FOR USE IN MINIMALLY INVASIVE SURGERY	2012-02-02	

FIGURE 4.34 – Brevets d'instruments chirurgicaux avec structure sérielle (à gauche) et parallèle (à droite).