



HAL
open science

La robotisation en chirurgie. Les concepts

Jocelyne Troccaz

► **To cite this version:**

Jocelyne Troccaz. La robotisation en chirurgie. Les concepts. Pr Xavier Martin. Robotisation de la chirurgie. Etat des lieux, Académie Nationale de Chirurgie, 2020. hal-02987755

HAL Id: hal-02987755

<https://hal.science/hal-02987755v1>

Submitted on 4 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ACADÉMIE NATIONALE de CHIRURGIE

French Academy of Surgery

Les Cordeliers - 15, rue de l'École de Médecine - 75006 Paris
Tél. 01.43.54.02.32 - E-Mail : administration@academie-chirurgie.fr - Site : www.academie-chirurgie.fr

RAPPORT

LA ROBOTISATION EN CHIRURGIE ÉTAT DES LIEUX

15 Juillet 2020
Paris

Présidence
Professeur Xavier MARTIN

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	3
Pr Xavier MARTIN, Président Académie Nationale de Chirurgie - xavier.martin@chu-lyon.fr	
LES CONCEPTS	4-13
Pr Jocelyne TROCCAZ, Directrice de recherche CNRS, Directrice Labex CAMI - jocelyne.troccaz@univ-grenoble-alpes.fr	
LES ULTRASONS THÉRAPEUTIQUES ROBOTISÉS	14-21
Pr Jean-Yves CHAPELON, Directeur émérite INSERM - jean-yves.chapelon@inserm.fr Pr Cyril LAFON, Directeur LABTAU - U1032@inserm.fr	
LES LASERS MÉDICAUX ROBOTISÉS	22-25
Pr Serge MORDON, Lille U1189 OncoThai - serge.mordon@inserm.fr	
UROLOGIE ET ROBOTIQUE : PASSÉ ET FUTUR	26-28
Pr Pierre MOZER, Professeur des universités, Praticien hospitalier - pierre.mozer@aphp.fr / http://www.isir.upmc.fr/	
LA NAVIGATION ET LA ROBOTIQUE APPLIQUÉE EN ORTHOPÉDIE	29-31
Pr Jérôme TONETTI, Professeur des universités Praticien hospitalier - jtonetti@chu-grenoble.fr	
CHIRURGIE DIGESTIVE ROBOTIQUE, ÉTAT DE L'ART EN 2020	32-34
Pr Alain VALVERDE, Chirurgien viscéral, GH Diaconesses Croix Saint Simon Paris - avalverde@hopital-dcss.org	
ROBOTIQUE EN CHIRURGIE CARDIAQUE, POUR QUI, POURQUOI, POUR QUELS RÉSULTATS, À QUEL PRIX ?	35-36
Prs Fadi FARHAT, Marco VOLA et Olivier JEGADEN, PU-PH - fadi.farhat@chu-lyon.fr	
CHIRURGIE THORACIQUE ROBOTIQUE	37-40
Prs Edouard SAGE, PU-PH et Matthieu GLORION, PH, Hôpital Foch Suresnes - e.sage@hopital-foch.com	
LA ROBOTISATION EN NEUROCHIRURGIE	41-43
Prs Bertrand MATHON, PH et Alexandre CARPENTIER, PU-PH - alexandre.carpentier@aphp.fr	
LA CHIRURGIE ROBOTIQUE EN GYNÉCOLOGIE, LA FRANCE A-T-ELLE PERDUE SON LEADERSHIP EN CHIRURGIE MINI-INVASIVE ?	44-45
Prs Vincent LAVOUE, PU-PH, Pierre COLLINET, PU-PH et Hervé FERNANDEZ, PU-PH et Président de la Société de chirurgie gynécologique et pelvienne - herve.fernandez@aphp.fr	
CHIRURGIE ROBOT ASSISTÉE EN OPHTALMOLOGIE	46-49
Pr Tristan BOURCIER, Professeur des universités, praticien hospitalier Strasbourg - tristan.bourcier@chru-strasbourg.fr	
ROBOTS ET CHIRURGIE OTO-RHINO-LARYNGOLOGIQUE ET CERVICO FACIALE	50-51
Prs Olivier STERKERS, Professeur des universités praticien hospitalier et Yann NGUYEN - olivier.sterker@aphp.fr	
LA CHIRURGIE ROBOTIQUE PÉDIATRIQUE EN 2020	52-54
Prs Thomas BLANC, MCU-PH, Yves HELOURY, Sabine SARNACKI, PU-PH - thomas.blanc@aphp.fr	
ROBOTISATION EN CHIRURGIE DENTAIRE, ÉTAT DES LIEUX	55-56
Pr Marwan DAAS, Maître de conférences des universités, Praticien hospitalier - cabinet.marwann@wanadoo.fr	
ROBOTIQUE ET SYSTÈME DE SANTE IMPACT, POTENTIEL ET OFFRE DE SOINS, L'EXEMPLE DU ROBOT DA VINCI .	57-68
Pr Jean-Claude COUFFINHAL, Praticien hospitalier émérite, Argenteuil - couffinhal@yahoo.fr	
ROBOTIQUE ET OFFRE DE SOINS, UN EXEMPLE RÉGIONAL	69-77
Pr Jean-Claude COUFFINHAL, Praticien hospitalier émérite, Argenteuil - couffinhal@yahoo.fr	

LES CONCEPTS

Jocelyne TROCCAZ

Préambule

Il est certainement important de resituer cette appellation de chirurgie robotique au sein de multiples notions voisines ou intriquées. La chirurgie robotique nous parle de l'acte chirurgical réalisé avec une assistance robotique. Le focus est donc ici essentiellement clinique : quels gestes sont robotisés ? Quels sont les avantages et les difficultés de cette robotisation ? Ou plus généralement quel en est le service médical rendu ? Quels sont les défis cliniques que la robotique peut aider à relever ?

Plus largement que la chirurgie, la radiologie interventionnelle ou la radiothérapie peuvent, elles aussi, être assistées par robot. On parlera alors plus généralement d'interventions robotisées dès lors qu'un robot intervient dans la réalisation d'un geste thérapeutique en portant un outil ou un capteur (endoscope par exemple).

Si l'on se déplace du côté de la technologie, on parlera de robotique chirurgicale ou plus généralement de robotique interventionnelle. Les questions seront relatives aux possibilités techniques : quelle architecture mécanique de robot ? quel actionnement ? quel mode d'interaction avec l'utilisateur ? quels capteurs ? quels logiciels ? quelle « intelligence » dans la machine ? Quels sont les progrès scientifiques et technologiques nécessaires et utiles au développement de systèmes d'assistance au geste ?

À ceci s'ajoutent les contraintes liées aux dispositions réglementaires et de certification des dispositifs médicaux matériels et logiciels lorsque les recherches amorcent les cycles d'évaluation et transfert clinique et industriel. Enfin, le coût d'investissement et de fonctionnement et le coût humain, nécessaires à l'utilisation de tels dispositifs sont également des questions d'importance.

Il est bien évident que ces champs de la robotique chirurgicale, de la chirurgie robotisée et du dispositif médical sont intriqués et que leurs acteurs scientifiques, cliniques, industriels ou institutionnels doivent s'y retrouver pour travailler de concert. Ce rapport doit y contribuer. C'est pourquoi il est organisé en deux parties principales traitant du versant technologique et du versant clinique et de leur rencontre dans l'usage de routine. Nous évoquerons également des dispositifs d'assistance contemporains des développements robotiques, en particulier les systèmes de navigation chirurgicale, et plus généralement de la place de l'informatique et de l'imagerie médicale dans la réalisation de gestes assistés par robot.

Un peu d'histoire

Le 25 juin 1985, le New York Times publiait un article¹ intitulé « A robot arm assists in 3 brain operations » relatant en détail la troisième expérience sur patient de l'utilisation d'un robot pour assister un geste interventionnel sous scanner. Démarrées quelques mois plus tôt, ces expérimentations cliniques étaient menées au Memorial Hospital de Los Angeles par Le Dr Yin San Kwoh, radiologue. Le robot, un PUMA 200 de la société Unimation, relié à un ordinateur et installé dans l'enceinte d'un scanner, positionnait un guide permettant au médecin de diriger son geste pour un accès mini-invasif à une cible cérébrale définie dans les images 3D. Une série de 22 patients était évoquée en 1988 dans un papier scientifique sur le projet publié dans un journal de robotique (Kwoh et al., 1988). A la même époque, le Dr Patrick Kelly, neurochirurgien à la Mayo Clinic de Rochester, réalisait des interventions de neurochirurgie stéréotaxique assistées par ordinateur : le dispositif utilisé combinait un cadre stéréotaxique motorisé et un faisceau laser, tous deux positionnés et commandés informatiquement à partir des données d'une imagerie tridimensionnelle, scanner ou IRM. Si ce dispositif (Kall et al., 1985) marqua peut-être moins les esprits que le robot à 6 degrés de liberté introduit au scanner, il préfigurait déjà parfaitement l'intégration aux instruments chirurgicaux de fonctions robotiques sophistiquées. Un papier de 1986 du Journal of Neurology (Kelly et al., 1986) rapportait déjà une série de 83 procédures sur 78 patients ; les Proceedings de la Mayo Clinic décrivaient, en 1988 (KELLY, 1988), les résultats de l'inclusion de 226 patients opérés avec ce même dispositif de juillet 1984 à juillet 1987. Cette époque était très féconde en innovations technologiques pour la médecine et la chirurgie puisque, en parallèle, le Pr Watanabe et le Dr Mösgeles et leurs équipes réalisaient, respectivement au Japon et en Allemagne, les développements et les évaluations cliniques des premiers systèmes de navigation chirurgicale en neurochirurgie et en chirurgie ORL. Dans les deux cas, la position d'un outil chirurgical fixé sur un bras mécanique articulé non motorisé, était calculée et visualisée en temps réel par rapport à une cible définie dans l'imagerie scanner tridimensionnelle, informant ainsi, en continu, le chirurgien de la progression de sa procédure. Le lien entre données scanner et référentiel peropératoire était calculé grâce à l'utilisation de quelques points anatomiques désignés dans les images et palpées sur le patient. Les équipes de Watanabe (Kosugi et al., 1988) et Mosges (Mösgeles & Schlöndorff, 1988) rapportaient toutes deux les résultats relatifs à des séries d'une quinzaine de patients dans des publications de 1988. À Grenoble, en mars 1989, un premier patient était opéré grâce à l'assistance d'un robot par le Pr Alim Benabid en neurochirurgie stéréotaxique. Il serait le premier de plusieurs dizaines de milliers d'autres opérés grâce à l'assistance de ce prototype développé au sein du laboratoire TIMC (en particulier par Stéphane Lavallée² (Lavallée, 1989), (Lavallee et al., 1992) et Philippe Cinquin³), puis par le système Neuromate, issu de l'industrialisation de ce concept. Il est remarquable que ce robot soit encore vendu (Renishaw plc.) près de 30 ans après son développement.

On voit donc, dans ce bref retour aux pionniers du domaine, que l'abord mini-invasif des structures cérébrales, que ce soit par la neurochirurgie, la radiologie interventionnelle ou la chirurgie ORL, a jeté les bases de nombreuses innovations technologiques et cliniques réalisées depuis lors. La première image scanner cérébrale avait été acquise en 1972 par Hounsfield ; il ne fallut donc pas beaucoup plus d'une décennie pour moderniser le concept de stéréotaxie en connectant l'ordinateur au bistouri par le biais de l'image et du robot. Ce domaine du « Geste Médico-Chirurgical assisté par Ordinateur (GMCAO) » est donc né il y a plus de trois décennies, résultant des évolutions propres de nombreuses disciplines, dont la médecine et la chirurgie, et des grandes découvertes et révolutions technologiques du 20^{ème} siècle et du 21^{ème} siècle, puis de leur convergence.

1. Cf. <http://www.nytimes.com/1985/06/25/science/a-robot-arm-assists-in-3-brain-operations.html>

2. Stéphane Lavallée a obtenu le Prix de l'Académie Nationale de Chirurgie en 2011 pour l'impact de ses très nombreuses contributions dans la pratique chirurgicale.

3. Philippe Cinquin a obtenu la médaille Ambroise Paré de l'Académie Nationale de Chirurgie en 2014 pour son rôle clé dans l'émergence du domaine en France notamment.

Le domaine des Gestes Médico-Chirurgicaux Assistés par Ordinateur (GMCAO)

Plus largement que la seule robotique, la problématique générale de l'assistance informatisée au geste médico-chirurgical est donc d'aider le médecin⁴ à réaliser de façon fiable, sûre, efficace et aussi peu invasive que possible, un geste diagnostique ou thérapeutique. Cette problématique est résumée dans la figure JT.1. Ce domaine a différents versants scientifiques et technologiques et couvrent plusieurs disciplines.

Comme on l'a vu dans l'introduction l'imagerie y a une part prépondérante : aujourd'hui, plus que jamais, le soignant manipule de très nombreuses informations issues de l'imagerie métabolique, anatomique ou même biologique. Le geste chirurgical lui-même est souvent conditionné à l'obtention de données peropératoires, souvent des images. Grâce aux progrès de l'informatique et des technologies de capteurs ces informations sont de plus en plus précises mais aussi de plus en plus denses et complexes à interpréter. Il est donc rapidement devenu indispensable de traiter ces données informatiquement pour en extraire l'information pertinente et fusionner ces différentes modalités ou ces données acquises en différentes temporalités. C'est le domaine du traitement du signal et de l'image et de la fusion de données. Nous reviendrons dans un paragraphe spécifique sur la problématique de la mise en correspondance - encore appelé recalage - des référentiels (données préopératoires, peropératoires, robot, etc.) centrale dans de nombreux systèmes d'assistance existants.

Cette fusion peut concerner également l'utilisation d'informations et de connaissances non spécifiques du patient traité mais utiles au geste : par exemple un atlas anatomique, un modèle biomécanique, des statistiques sur la localisation d'un cancer, un protocole chirurgical type, etc. De nombreux modèles peuvent ainsi être intégrés au système de GMCAO et utilisés pour la préparation ou la réalisation du geste.

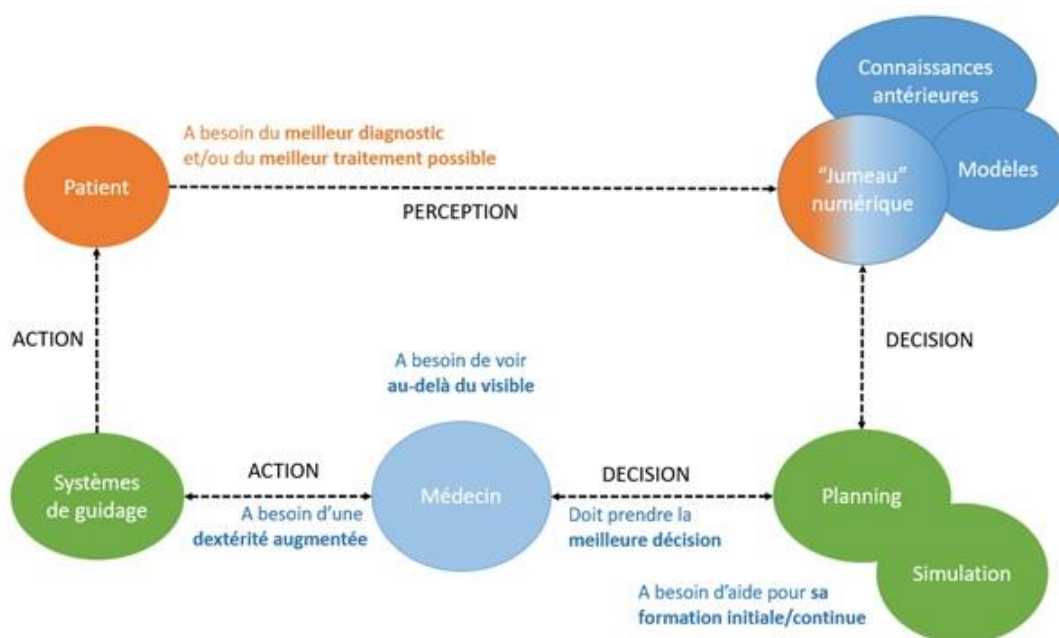


Figure JT.1 : Problématique générale du Geste Médico-Chirurgical Assisté par Ordinateur.

La planification du geste peut en effet être assistée par ordinateur ; ainsi quand la notion de geste optimal peut être définie précisément - par exemple des contraintes de dose à délivrer à un volume tumoral en radiothérapie - le système de GMCAO pourra prendre en charge le calcul de la stratégie optimale - dans ce cas, la balistique du traitement de radiothérapie. Le plus souvent, des outils d'interaction avec le « patient numérique » permettront au clinicien de réaliser cette planification ; par exemple il définira et enregistrera une trajectoire de ponction à réaliser ou le placement d'une vis intra-pédiculaire. Cette planification peut être facilitée par différents logiciels permettant de vérifier l'adéquation du plan réalisé aux critères propres au geste à réaliser : par exemple le respect de certains axes biomécaniques ou l'absence de conflit osseux en chirurgie prothétique de la hanche ou du genou. Idéalement, une simulation (biomécanique ou autre) permet d'anticiper les effets fonctionnels du geste. Notons que la simulation informatisée est également primordiale pour la formation initiale et continue des chirurgiens (cf. rapport⁵ de la HAS en 2012). Ajoutons également que le recours à l'intelligence artificielle repose la question de la planification sous la forme de reconnaissance de cas cliniques et d'inférence de plans patient-spécifiques à partir de bases de connaissances de cas passés. De nombreux travaux de recherche sont en cours sur ce thème.

Le geste planifié devra ensuite être réalisé de façon conforme par le clinicien ; pour cela, il pourra être assisté grâce à différents dispositifs dits de guidage. Les deux principales catégories ont été présentées dans la section introductive : il s'agit des systèmes de navigation chirurgicale et des robots chirurgicaux. On compte aussi depuis quelques années les gabarits patient-spécifiques dont le principe fut introduit au milieu des années 90 (Radermacher et al., 1998). Ce sont des guides de coupe personnalisés destinés à remplacer, notamment en chirurgie orthopédique, les nombreux ancillaires nécessaires à la réalisation de certains gestes. Différents niveaux d'automatisation du geste sont donc possibles, l'assistance allant d'une simple information donnée au clinicien sous forme visuelle (pour la navigation par exemple) à la réalisation autonome d'une action par un robot en passant différents intermédiaires sur lesquels nous reviendrons dans ce qui suit.

4. Chirurgien, radiologue interventionnel, radiothérapeute, etc.

5. Accessible sur https://www.has-sante.fr/jcms/c_930641/fr/simulation-en-sante

Qu'est-ce qu'un robot ?

Certainement un peu à tort, on utilise de plus en plus fréquemment le terme « robot » pour désigner un automatisme, même s'il est uniquement logiciel. On parle ainsi de « chatbot » pour désigner un logiciel de dialogue entre un ordinateur et un humain ou on utilise le terme de « robot trader » pour nommer les logiciels de trading haute fréquence utilisés dans le domaine de la finance. Pour ce qui nous concerne ici, le robot est une machine physique capable de motricité, grâce à des actionneurs (des « moteurs »), utilisée pour se mouvoir elle-même dans l'espace physique et/ou pour y déplacer un effecteur (un « outil »). Mais là encore, le terme est souvent le sujet de discussions polémiques dès lors qu'on parle d'une machine automatisée, préprogrammée, répétitive et sans aucune adaptation à la tâche réalisée. Transparaît donc la notion de variabilité d'une tâche et la nécessité d'une adaptation à celle-ci. Dans le domaine des applications médicales, cette variabilité est évidente tout autant en termes des gestes concernés que des patients pour lesquels ils sont réalisés. Mais pour que le robot puisse percevoir son environnement et ses changements éventuels, il doit être associé à des capteurs qu'il porte (par exemple un capteur de force) ou dont il reçoit les informations via un ordinateur (par exemple, un scanner préopératoire ou des images endoscopiques peropératoires). Pour pouvoir réagir à cette variabilité, il faut que l'information venant de ces capteurs soit traitée par des moyens informatiques. Dans le contexte qui nous intéresse ici, le robot est donc une machine physique connectée à un ordinateur, opérant sur un patient au moyen de différents outils en coopération avec un utilisateur humain. Selon les dispositifs développés, la capacité d'adaptation à la tâche sera plus au moins automatisée ou en d'autres termes la prise de décision relative à l'exécution conforme de la tâche sera plus ou moins distribuée entre le robot et son utilisateur.

Classification des robots selon leur degré d'autonomie

De nombreuses classifications des robots chirurgicaux ont été proposées. À des fins de concision et de simplification, nous organiserons cette section en fonction de l'existant utilisé en clinique et non avec toutes les sous-catégories relatives à des travaux quelquefois encore exploratoires sur le plan scientifique et technologique. Nous invitons le lecteur intéressé à prendre connaissance d'un état de l'art récent (Troccaz et al., 2019) plus exhaustif. Les trois catégories de robots décrites sont : les robots actifs, les robots semi-actifs ou co-manipulés et les robots téléopérés (cf figure JT.2).

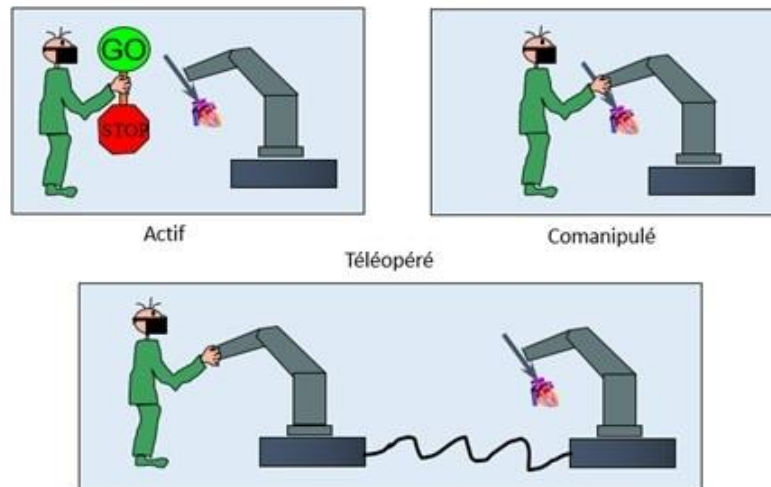


Figure JT.2 : Trois types d'interaction entre le robot et son utilisateur.

Certainement inspirée par la robotique manufacturière, l'idée d'utiliser le robot pour usiner des surfaces osseuses en orthopédie est venue assez naturellement. On mentionnera évidemment Robodoc, développé dès 1986 au sein d'un centre de recherche d'IBM (Yorktown Heights), sous la responsabilité de Russell H. Taylor (actuellement Professeur à Johns Hopkins University, Baltimore), en collaboration avec des équipes cliniques pour la préparation de cavité fémorale des prothèses de hanche (Paul et al., 1992). L'objectif était double : positionner au mieux la prothèse selon un planning réalisé sur scanner et réaliser, de façon très précise, la cavité destinée à la recevoir, pour éviter le recours au ciment. Robodoc est un robot actif : moyennant une étape préliminaire de localisation par rapport au patient, il réalise la tâche planifiée d'usinage de la cavité de façon autonome, sous contrôle d'informations venant d'un capteur de force et sous supervision du chirurgien. Ces robots actifs, bien que pionniers, restent finalement encore assez peu nombreux du fait des questions de sécurité qu'ils soulèvent potentiellement et par l'interaction limitée qu'ils impliquent avec leur utilisateur. A l'heure actuelle, ils sont pour l'essentiel réservés à des tâches non réalisables selon un autre mode d'interaction.

L'évolution des pratiques chirurgicales, en particulier avec le développement de la coelïochirurgie, créa également de nouveaux besoins du fait de l'utilisation d'une optique mobile et d'un accès restreint et indirect aux organes. Cette pratique opérant sur des tissus mobiles et déformables ne permettait plus d'envisager l'automatisation du geste. Celui-ci est beaucoup moins prédictible dans le détail de son exécution puisque l'environnement est très variable au cours d'une tâche. C'est ce qui a suscité le développement de systèmes de télé-opération⁶ pour lesquelles le chirurgien télécommande le robot. Dans un premier temps c'est l'endoscope qui était déplacé par le robot : pour AESOP (initialement Computer Motion Inc.) l'opérateur utilisait une commande vocale pour cela. Ceci n'est guère possible pour déplacer les instruments en raison de la complexité des mouvements requis.

6. Le terme « télé-opération » n'est pas spécifique de la chirurgie mais désigne un système opéré (contrôlé) à distance. La télé-opération robotique a été introduite initialement dans le domaine du nucléaire pour la manipulation à distance de matériaux irradiés. L'appellation de système « maître-esclave » est aussi issue de ce domaine.

C'est pourquoi, on utilise le plus souvent un système mécanique dit « maître » manipulé par l'opérateur. Un robot dit « esclave » reproduit le geste avec une éventuelle fonction de transfert (intégrant un changement d'échelle des forces ou des déplacements et un filtrage des tremblements) ; ce sont par exemple les robots ZEUS (initialement Computer Motion Inc.) ou DaVinci (Intuitive Inc.). Plus récemment ce sont les systèmes Sensei/Magellan (initialement Hansen Medical Inc) ou Niobe/Genesis (Stereotaxis Inc.) permettant de manipuler un cathéter pouvant être lui-même robotisé ou un stent pour des gestes interventionnels endovasculaires (Riga et al., 2009) ou intracardiaques (SZILI-TOROK et al., 2012). Ce sont également des systèmes dédiés à la chirurgie endoluminale tels que le Flex Robotic Scope (Medrobotics, Inc.) utilisé pour la chirurgie endorectale ou transorale (Mattheis et al., 2017). Le robot est, dans cet exemple, un endoscope articulé dont le chirurgien pilote l'extrémité distale. Le système garantit que le « corps » du robot suit son extrémité par le même chemin. La technique est appelée « Follow The Leader » et assure un certain niveau de sécurité de la trajectoire réalisée. Dans ce domaine applicatif, il est facile de suivre l'évolution des technologies en lien avec la réduction du caractère invasif des gestes chirurgicaux ou radiologiques interventionnels : coelochirurgie, single port, endoluminal (voir NOTES). C'est incontestablement, à l'heure actuelle, le domaine roi de la chirurgie robotique. La télé opération permet également d'envisager la chirurgie à (grande) distance. Ceci reste néanmoins un usage qui a été limité à des démonstrations de faisabilité ; on citera pour mémoire l'opération Lindberg entre New-York et Strasbourg en septembre 2001 par le Pr Marescaux avec le système ZEUS (Marescaux et al., 2001).

Entre ces deux extrêmes (robot actif et robot téléopéré), on trouve un niveau d'interaction intermédiaire où le robot contraint les déplacements possibles de l'outil mais ce dernier est manipulé directement par le chirurgien. C'est cette approche qui a été mise en œuvre dans les robots de neurochirurgie stéréotaxique ou en orthopédie (chirurgie prothétique - genou en particulier - ou visée pédiculaire). Ce sont, par exemple, les systèmes Neuromate (Renishaw plc. initialement IMMI SA), Rosa (Zimmer-Biomet Inc. initialement Medtech SA) ou le robot Renaissance (Medtronic Inc. initialement Mazor Robotics). Dans tous ces cas, le robot déplace un guide-outil vers une position planifiée. Lorsque cette position est atteinte, le robot est stoppé et le chirurgien introduit l'outil par ce guide pour réaliser la trajectoire planifiée (ici une ligne droite). Le système Omnibot (initialement développé par Praxim SA, maintenant Corin group Inc.) contraint, quant à lui, le geste dans un plan pour la découpe des surfaces osseuses en chirurgie du genou. Ce type de systèmes a été initialement qualifié de robot semi-actif. Par la suite, cette approche a évolué vers une assistance plus dynamique, permettant des tâches géométriquement plus complexes et programmables. Ainsi un robot pourra contraindre l'outil déplacé par le chirurgien à rester dans une zone prédéfinie dans le planning opératoire. Cette approche est appelée le plus souvent comanipulation. L'appellation anglophone « hands-on » illustre parfaitement ce concept. C'est le cas du robot Mako (Stryker Inc. initialement Mako Inc.) ou d'Acrobot (Stryker Inc. initialement Acrobot Ltd.) qui contraignent l'outil dans la zone de la cavité osseuse à réaliser en chirurgie orthopédique.

Pour finir, mentionnons que les robots actifs ont aussi évolué grandement dans leur capacité d'adaptation automatique à la tâche et c'est certainement un de leurs avantages principaux. Quand Robodoc nécessitait que l'os sur lequel on intervenait soit immobilisé, le système Cyberknife (Accuray Inc.) s'adapte automatiquement à la position d'une tumeur qui bouge avec la respiration lors d'un traitement en radiothérapie. Ce système est basé sur la connexion du robot avec différents capteurs et avec un modèle liant bougés internes de la cible à des bougés de marqueurs externes (Schweikard et al., 2004). Ceci permet de déduire la position de la tumeur en suivant la position du thorax du patient et de modifier, en temps réel, la trajectoire du robot, en conséquence, pour la délivrance de la dose prescrite.

Avantages attendus des robots chirurgicaux et contraintes associées

Sans anticiper sur les chapitres suivants de ce rapport qui déclineront les usages spécifiques selon les spécialités, nous entrevoyons que les propriétés du robot potentiellement intéressantes dans le champ interventionnel sont : sa précision (aller là où l'on veut), sa répétabilité (y retourner de façon identique), sa résolution (le plus petit mouvement réalisable et mesurable), la possibilité de contrôle des efforts, la possibilité de commande à distance et la connexion du robot avec l'information numérique (données de capteurs, données du patient, planning opératoire, etc.). Son potentiel de miniaturisation ouvre également un champ applicatif immense.

Il semble donc particulièrement intéressant pour :

- Réaliser (ou aider à réaliser) des tâches géométriquement complexes ;
- Porter et déplacer des dispositifs lourds (microscope opératoire, appareil de traitement en radiothérapie, systèmes radiologiques) ;
- Fournir une troisième main ;
- Permettre une action à distance ou en milieu hostile (contamination chimique, biologique, radiologique) ;
- Accroître la précision et la résolution du geste (amplitude, force), filtrer des mouvements parasites ;
- Permettre un suivi automatisé, temps réel, d'une cible mobile ;
- Permettre des déplacements et des actions, intracorporels.

En contre-point, différentes questions techniques sont à traiter avec soin :

- La facilité d'installation, de formation, d'utilisation en routine clinique et de maintenance ;
- La qualité (par exemple, un faible taux de pannes) ;
- La sécurité logicielle et matérielle (mécanique, électrique, électromagnétique, chimique, etc.) relativement aux patients et aux équipes soignantes ;
- La capacité à garantir le niveau requis de stérilité du geste.

Cette liste n'est pas exhaustive.

Du planning au patient

À l'exception des systèmes téléopérés pour lesquels un opérateur humain dirige le robot, à tout instant, et adapte continuellement son action à la situation qu'il perçoit (par exemple via des images endoscopiques), les systèmes robotisés intègrent une phase de planification de la tâche via des images pré- ou peropératoires du patient. Le robot peut être vu comme une interface qui connecte les données numériques du planning à la réalité physique du patient lors de l'intervention.

Dès lors, il faut relier informatiquement les images, le robot et le patient pour permettre la réalisation par le robot sur le patient réel de la tâche planifiée sur les images. Un composant essentiel des systèmes robotisés concerne donc la mise en relation des référentiels (7) attachés au robot, aux images et au patient réel (cf. figure JT.3).

Ce composant des systèmes robotisés s'appelle « recalage du robot ». Sa précision est primordiale puisqu'elle conditionne la qualité de l'exécution de la tâche. « Qualité » est à entendre, ici, dans le sens restreint de « conformité au planning ». Cette étape de recalage est plus ou moins complexe. Nous allons l'illustrer par quelques exemples représentatifs des approches utilisées.

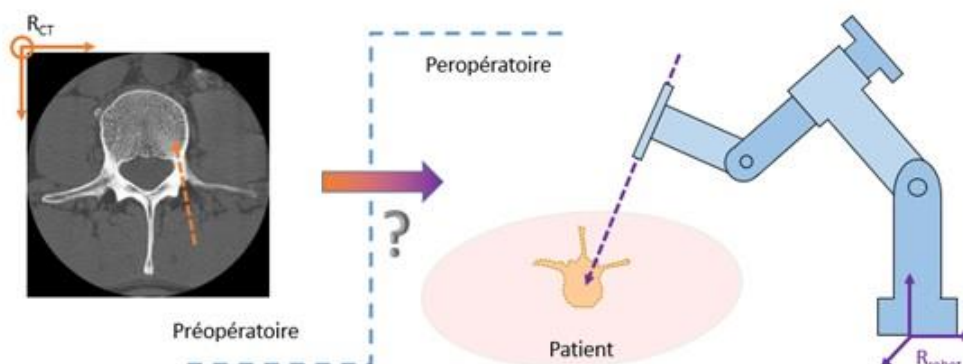


Figure JT.3 : Recalage du robot ou « comment transférer le planning (trajectoire orange), réalisé dans les images préopératoires, dans le référentiel peropératoire du robot (trajectoire violette) » en conformité avec la position peropératoire du patient.

L'approche la plus simple consiste à mettre en correspondance des paires de points spécifiques exprimés dans deux référentiels : par exemple des points particuliers à la fois visibles dans le scanner et « palpables » grâce au robot. Ainsi, dès les premières versions de Robodoc (Taylor, 1994), des marqueurs (vis en titane) étaient implantés dans le fémur proximal et distal du patient avant réalisation du scanner préopératoire. En même temps que le planning (détermination de la position optimale de la prothèse fémorale), les positions des marqueurs visibles sur le scanner étaient repérées manuellement par l'opérateur et enregistrées en même temps que le planning opératoire (donc dans le même référentiel). Pour mettre en correspondance le robot, le patient réel et le planning préopératoire, un temps peropératoire initial était consacré à la palpation, grâce au robot, de ces marqueurs exposés chirurgicalement. L'opérateur humain devait déplacer le Robodoc pour amener son outil au contact des marqueurs. Chacun de ces marqueurs était donc, ainsi, également repéré dans le référentiel du robot. Grâce au calcul automatique de la transformation permettant de superposer au mieux les marqueurs vus dans le scanner préopératoire aux marqueurs physiques touchés en peropératoire, il devient possible de transférer le planning dans le référentiel du robot pour qu'il soit réalisable pour la position courante du patient. Cela suppose que le patient (ou son fémur dans le cas de Robodoc) ne bouge pas pendant l'intervention. Les fixateurs externes en orthopédie ou les cadres stéréotaxiques en neurochirurgie fournissent cette fonction d'immobilisation. Nous reviendrons sur ce point ultérieurement.

Une alternative à l'utilisation de marqueurs (vis ou cadres, invasifs, ou marqueurs collés sur la peau moins précis) consiste à utiliser des points anatomiques visibles dans l'imagerie servant au planning et palpables en peropératoire (cf. figure JT.4). C'est une approche communément utilisée en orthopédie notamment pour initialiser une méthode plus complexe. La qualité du recalage des paires de points dépend de la qualité de la localisation des points utilisés. En théorie, 3 paires de points non alignés suffisent à déterminer la transformation (3 translations et 3 rotations) entre deux référentiels. Néanmoins, l'ajout de paires de points peut amoindrir l'effet de l'erreur faite lors de la localisation de certains d'entre d'eux. En pratique, le nombre de points est à choisir dans un compromis entre précision souhaitée et temps requis.

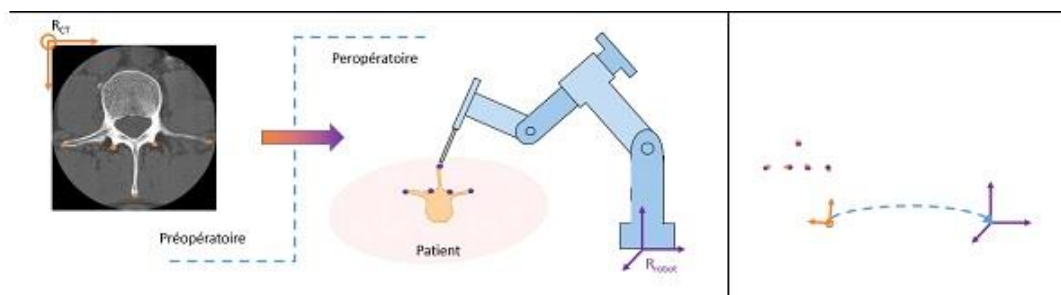


Figure JT.4 : Recalage de points appariés : (gche) quelques points anatomiques remarquables détectés sur le scanner et palpés par le robot) - (dte) : recherche de la transformation (flèche pointillée) entre référentiels robot (violet) et scanner (orange) qui superpose au mieux les points sélectionnés - après recalage tout ce qui est connu dans le repère scanner est également connu dans le repère robot (et vice et versa).

L'approche précédente requiert que chaque point ait son correspondant, ce qui peut s'avérer fastidieux. D'autres approches consistent à mettre en correspondance de grands ensembles de points (appelés « nuages de points ») de façon globale, c'est-à-dire sans nécessité que chaque point d'un ensemble ait son correspondant dans l'autre ensemble. Par exemple la surface d'une structure anatomique extraite dans l'imagerie préopératoire sera recalée, c'est-à-dire superposée au mieux, avec une portion de cette surface acquise en peropératoire (cf. figure JT.5). On parle alors de recalage de surfaces.

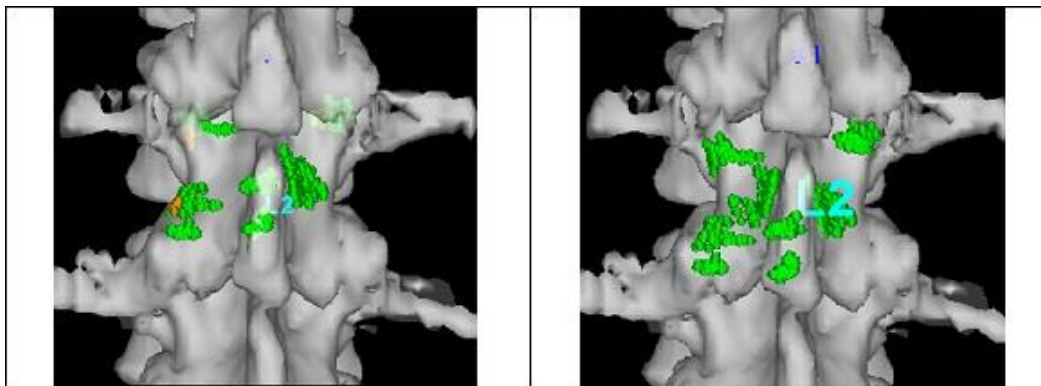


Figure JT.5 : Recalage de nuages de points - en vert, points peropératoires palpés sur la vertèbre et, en gris, modèle venant d'un scanner préopératoire du patient - (à gauche) avant recalage (à droite) après recalage.

La surface peropératoire peut être palpée par l'outil du robot ; elle peut aussi être palpée sans contact par un capteur monté sur le robot. À titre d'exemple, le robot ROSA utilisé en neurochirurgie est équipé d'un système de vision comportant une caméra et un laser ; ce capteur permet de numériser des collections de points de la tête du patient (sur le front et sur l'arête nasale). Comme le capteur est fixé sur le robot, ces points sont connus dans le référentiel du robot (« on sait où est le patient par rapport au robot »). Ces points sont ensuite superposés automatiquement avec la surface cutanée extraite, elle aussi automatiquement, de l'imagerie préopératoire (IRM ou scanner). Cela étant réalisé, le planning préopératoire peut être transféré dans le référentiel du robot pour l'exécution du geste. Il faut préciser cependant que ceci n'est possible qu'à condition de connaître la relation entre le référentiel du capteur et celui du robot. Ceci nécessite ce qu'on appelle un étalonnage, aussi appelé « calibration ». Cette étape de calibration est généralement préétablie par le constructeur, qui, le cas échéant met à disposition une procédure spécifique de maintenance. Le recalage de surface nécessite néanmoins quelques précautions : le choix des données à recaler doit permettre de déterminer de façon univoque la transformation les superposant au mieux. On imagine aisément qu'une portion de sphère a une infinité de façons d'être positionnée sur la sphère d'origine. C'est pourquoi, dans le cas de ROSA, la zone acquise est répartie sur le front et le nez dont les courbures permettent un recalage sans ambiguïté. (Lefranc et al., 2014) décrit la mise en œuvre d'un recalage de paires de points et d'un recalage de surfaces du robot ROSA et en compare les résultats.

Dans d'autres systèmes, un capteur peropératoire, non porté par le robot, sert à recaler le robot. C'est le cas des systèmes Neuromate ou MazorX qui utilisent des images radiologiques peropératoires pour faire le lien avec une imagerie préopératoire. Dans ce cas encore, cela nécessite de connaître la relation entre le référentiel du robot et celui du système d'imagerie mais cette relation n'est pas intangible et doit être déterminée à chaque utilisation du dispositif. Cela peut se faire en mettant sur un objet connu porté par le robot des marqueurs radio-opaques visibles sur les images radiologiques (cf. figure JT.6). Ces marqueurs serviront à établir la relation entre référentiel robot et référentiel radiologique. Les images radiologiques servant aussi à faire le lien entre l'anatomie préopératoire (une vertèbre visible sur le scanner par exemple) et l'anatomie peropératoire (donnée par les images radiologiques). La mise en correspondance des images est un sujet très vaste (James & Dasarathy, 2014) que nous n'aborderons pas ici mais elle partage nombre de méthodes avec le recalage du robot.



Figure JT.6 : Mise en relation du référentiel du robot avec celui de l'imagerie radiologique peropératoire (ici bi-plane) grâce à un objet de géométrie connue porté par le robot et portant des marqueurs radio-opaques. (TIMC-IMAG, CHU de Grenoble, 1988).

Enfin, nous avons évoqué précédemment la nécessité que la cible ne bouge pas entre le recalage du robot et le geste opératoire et tout au long de ce geste afin que le planning préopératoire reste valide. Une alternative à l'immobilisation du patient ou de la cible consiste à suivre les éventuels bougés de celle-ci et à mettre à jour le planning en temps réel. Là encore différentes approches sont possibles : les domaines de la neurochirurgie et de l'orthopédie ont largement recours à l'utilisation de localisateurs (le plus souvent optiques) qui suivent des marqueurs se déplaçant solidairement avec la cible : par exemple des marqueurs fixés sur le crâne du patient pour une neurochirurgie ou implantés via une vis sur une structure osseuse mobile. Dans ce cas, le localisateur doit aussi être étalonné par rapport au robot pour pouvoir relier les informations de ces deux dispositifs.

Nous avons également mentionné l'existence d'approches indirectes où une structure facilement visible permet d'inférer la position de la cible mais ceci nécessite un modèle de cette relation. C'était l'exemple du Cyberknife cité plus haut.

Une solution astucieuse a également consisté, dans des cas spécifiques, à concevoir des robots suffisamment petits pour être fixés sur un os par exemple pour bouger avec cet os : c'est le cas notamment du robot Omnibot pour la découpe de surfaces osseuses en chirurgie prothétique du genou.

Dans tous les cas, il faut être sûr que la modification de la tâche du robot « à la volée » est réalisable ; ainsi, si un outil rigide est déjà introduit dans le corps du patient la modification de la trajectoire est rarement envisageable. L'action chirurgicale devra être stoppée, l'outil retiré et le geste replanifié avant de reprendre en toute sécurité.

Évolutions technologiques des robots et directions futures

Depuis le premier robot chirurgical, il y a environ 35 ans, la technologie robotique a évolué : si les premiers exemplaires étaient des bras robotiques industriels modifiés pour un usage clinique (par exemple Robodoc), des conceptions spécifiquement médicales, intégrant dès les premières idées les contraintes spécifiques du domaine, ont peu à peu vu le jour. Ce monde de la robotique médicale s'est également clivé entre des dispositifs versatiles dans leurs applications, à grand espace de travail et donc souvent de grande taille, et des dispositifs spécifiques d'une application, souvent plus petits voire portés par le corps du patient ou endo-corporels. Si chacune de ces solutions apporte ses avantages et ses inconvénients de façon assez équilibrée, il apparaît clairement dans le tableau annexe que les dispositifs commercialisés en 2020 reposent sur des architectures de robots relativement classiques, plutôt généralistes. Il est probable que les motifs en soient essentiellement économiques du côté des fabricants.

Dans les laboratoires de recherche en robotique médicale, en France et dans le monde, les tendances sont toutes autres. Les nouveaux procédés par fabrication additive - la fameuse impression 3D - ouvrent la porte à de nouvelles possibilités de conception. Citons pour exemple (Pfeil et al., 2019) qui présente un prototype de robot de ponction sous scanner ou IRM réalisé par impression 3D multi-matériaux et intégrant des articulations tout à fait innovantes grâce à ces matériaux de rigidités différentes. Par ailleurs, de nombreux travaux récents concernent le domaine des robots continus : à l'image un peu simpliste d'une trompe d'éléphant, un robot continu permet de s'introduire dans des espaces contigus et courbes pour y déplacer un instrument ou un capteur vers une position cible. Ces robots hyper-redondants peuvent donc prendre une infinité de forme pour une position de leur extrémité distale. Une des implémentations parmi les plus étudiées s'appelle « robot à tubes concentriques » que l'on peut voir comme une antenne télescopique dont les segments ont une courbure précontrainte : en déployant plus ou moins chacun de ces segments et en les tournant sur eux-mêmes on obtient une variété de formes courbes possibles pouvant s'adapter à l'environnement anatomique. Les applications potentielles sont très nombreuses (Alfalahi et al., 2020). Bien évidemment l'ultra-miniaturisation permet également d'envisager des dispositifs robotisés navigant dans le corps : c'est un autre domaine extrêmement prometteur faisant la part belle à l'actionnement magnétique (Chautems et al., 2017). L'analyse économique du côté des utilisateurs pourrait peut-être se satisfaire davantage de dispositifs très miniaturisés, à usage unique.

Pour conclure ces perspectives, il convient de revenir sur le lien aux images et plus généralement aux données. On l'aura compris, le robot est un outil qui permet, au-delà de l'assistance qu'il fournit, de collecter nombre de données sur les gestes médico-chirurgicaux qui sont réalisés sous la forme des traces d'exécution des mouvements réalisés et des signaux et images captées (par exemple endoscopiques). A l'heure de la « deuxième vague » de l'Intelligence Artificielle permise par l'apprentissage profond sur des grandes masses de données, le potentiel est énorme en termes de modélisation de la qualité du geste réalisé et du développement d'assistances sensibles au contexte. Ainsi, un geste réalisé avec un robot téléopéré ou co-manipulé pourrait-il être monitoré en temps réel pour déclencher des messages spécifiques ou des alarmes, dans un cadre d'usage standard ou dans un cursus spécifique d'apprentissage. De nombreuses équipes se sont attaquées à ce problème depuis quelques années (Maier-Hein et al., 2017), (Derathé et al., 2020). Plus que jamais le lien entre médecins, scientifiques et ingénieurs est indispensable pour capter ces données, modéliser la qualité du geste et concevoir les outils de demain.

Références

- Alfalahi, H., Renda, F., & Stefanini, C. (2020). Concentric Tube Robots for Minimally Invasive Surgery: Current Applications and Future Opportunities. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/tmrb.2020.3000899>
- Chautems, C., Zeydan, B., Charreyron, S., Chatzipirpiridis, G., Pané, S., & Nelson, B. J. (2017). Magnetically powered microrobots: A medical revolution underway? *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 51(3), 405-407. <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezw432>
- Derathé, A., Reche, F., Moreau-Gaudry, A., Jannin, P., Gibaud, B., & Voros, S. (2020). Predicting the quality of surgical exposure using spatial and procedural features from laparoscopic videos. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 15(1), 59-67. <https://doi.org/10.1007/s11548-019-02072-3>
- James, A. P., & Dasarathy, B. V. (2014). Medical image fusion: A survey of the state of the art. *Information Fusion*, 19(1), 4-19. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2013.12.002>
- Kall, B. A., Kelly, P. J., & Goerss, S. J. (1985). Interactive stereotactic surgical system for the removal of intracranial tumors utilizing the CO2 laser and CT-derived database. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 32(2), 112-116. <https://doi.org/10.1109/TBME.1985.325611>
- Kelly, P. J. (1988). Volumetric Stereotactic Surgical Resection of Intra-axial Brain Mass Lesions. *Mayo Clinic Proceedings*, 63(12), 1186-1198. [https://doi.org/10.1016/S0025-6196\(12\)65405-6](https://doi.org/10.1016/S0025-6196(12)65405-6)
- Kelly, P. J., Kall, B. A., Goerss, S., & Earnest, F. (1986). Computer-assisted stereotaxic laser resection of intra-axial brain neoplasms. *Journal of Neurosurgery*, 64(3), 427-439. <https://doi.org/10.3171/jns.1986.64.3.0427>
- Kosugi, Y., Watanabe, E., Goto, J., Watanabe, T., Yoshimoto, S., Takakura, K., & Ikebe, J. (1988). An articulated neurosurgical navigation system using MRI and CT images. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 35(2), 147-152. <https://doi.org/10.1109/10.1353>
- Kwoh, Y. S., Hou, J., Jonckheere, E. a, & Hayati, S. (1988). A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 35(2), 153-160. <https://doi.org/10.1109/10.1354>
- Lavallée, S. (1989). Gestes médico-chirurgicaux assistés par ordinateur : application à la neurochirurgie stéréotaxique. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00335578>
- Lavallee, S., Troccaz, J., Gaborit, L., Cinquin, P., Benabid, A. L., & Hoffmann, D. (1992). Image guided operating robot: a clinical application in stereotactic neurosurgery. *Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 618-624. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1992.220223>
- Lefranc, M., Capel, C., Pruvot, A. S., Fichten, A., Desenclos, C., Toussaint, P., Le Gars, D., & Peltier, J. (2014). The impact of the reference imaging modality, registration method and intraoperative flat-panel computed tomography on the accuracy of the ROSA® stereotactic robot. *Stereotactic and Functional Neurosurgery*, 92(4), 242-250. <https://doi.org/10.1159/000362936>
- Maier-Hein, L., Vedula, S. S., Speidel, S., Navab, N., Kikinis, R., Park, A., Eisenmann, M., Feussner, H., Forestier, G., Giannarou, S., Hashizume, M., Katic, D., Kenngott, H., Kranzfelder, M., Malpani, A., März, K., Neumuth, T., Padoy, N., Pugh, C., ... Jannin, P. (2017). Surgical data science for next-generation interventions. *Nature Biomedical Engineering*, 1(9), 691-696. <https://doi.org/10.1038/s41551-017-0132-7>
- Marescaux, J., Leroy, J., Gagner, M., Rubino, F., Mutter, D., Vix, M., Butner, S. E., & Smith, M. K. (2001). Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature*, 413(6854), 379-380. <https://doi.org/10.1038/35096636>
- Mattheis, S., Hasskamp, P., Holtmann, L., Schäfer, C., Geisthoff, U., Dominas, N., & Lang, S. (2017). Flex Robotic System in transoral robotic surgery: The first 40 patients. *Head and Neck*. <https://doi.org/10.1002/hed.24611>

- Mösger, R., & Schlöndorff, G. (1988). A new imaging method for intraoperative therapy control in skull-base surgery. *Neurosurgical Review*, 11(3-4), 245-247. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3251168>
- Paul, H. A., Bargar, W. L., Mittlestadt, B., Musits, B., Taylor, R. H., Kazanzides, P., Zuhars, J., Williamson, B., & Hanson, W. (1992). Development of a surgical robot for cementless total hip arthroplasty. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 285, 57-66. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1446455>
- Pfeil, A., Roberto, •, Cazzato, L., Laurent Barbé, •, De Marini, P., Chiang, J. B., Garnon, J., Renaud, P., Gangi, A., Cazzato, R. L., Barbé, L., Fu, P., Rd, L., Lam, P. F., & Kong, H. (2019). Robotically Assisted CBCT-Guided Needle Insertions: Preliminary Results in a Phantom Model. *CardioVascular and Interventional Radiology*, 42, 283-288. <https://doi.org/10.1007/s00270-018-2088-8>
- Radermacher, K., Portheine, F., Anton, M., Zimolong, A., Kaspers, G., Rau, G., & Staudte, H. W. (1998). Computer assisted orthopaedic surgery with image based individual templates. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 354, 28-38. <https://doi.org/10.1097/00003086-199809000-00005>
- Riga, C., Bicknell, C., Cheshire, N., & Hamady, M. (2009). Initial clinical application of a robotically steerable catheter system in endovascular aneurysm repair. *Journal of Endovascular Therapy: An Official Journal of the International Society of Endovascular Specialists*, 16(2), 149-153. <https://doi.org/10.1583/08-2651.1>
- Schweikard, A., Shiomi, H., & Adler, J. (2004). Respiration tracking in radiosurgery. *Medical Physics*, 31(10), 2738-2741. <https://doi.org/10.1118/1.1774132>
- Szili-Torok, T., Schwatgen, B., Akca, F., Bauernfeid, T., Abkenari, L. D., Haitsma, D., Belle, Y. Van, Groot, N. DE, & Jordaens, L. (2012). Catheter Ablation of Ventricular Tachycardias Using Remote Magnetic Navigation: A Consecutive Case-Control Study. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, 23(9), 948-954. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8167.2012.02340.x>
- Taylor, R. H. (1994). System for manipulating movement of a surgical instrument with computer controlled brake. <https://patents.google.com/patent/US5695500A/en>
- Troccaz, J., Dagnino, G., & Yang, G.-Z. (2019). Frontiers of Medical Robotics: From Concept to Systems to Clinical Translation. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 21(1), 193-218. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-060418-052502>

Annexe

Tableau récapitulatif des robots interventionnels commercialisés

Cette liste se veut la plus complète possible mais n'est pas exhaustive. Elle est restreinte aux seuls produits industriels.

Légendes :

- Entreprise : commercialisant le produit au moment de la rédaction de ce rapport (printemps 2020) ;
- Produit : non commercial du produit ;
- Type de dispositif : quelques éléments descriptifs des technologies ;
- Domaine clinique : applications utilisatrices ;
- Type de contrôle : mode d'interaction avec l'utilisateur (actif, semi-actif, comanipulé, télé-opération). Télé-opération manuelle signifie qu'une interface distante est manipulée par l'utilisateur pour déplacer le robot esclave : télé-opération vocale signifie que l'utilisateur commande par la parole les déplacements du robot esclave ;
- Site web : donne l'adresse internet de l'entreprise au moment de la rédaction de ce rapport.

Entreprise	Produit	Dispositif	Domaine clinique	Type de contrôle	Site Web
Intuitive Inc.	DaVinci Xi et davinci SP	Laparoscopie robotisée (un robot multi-bras), instruments articulés	Coellio ("toute" spécialité)	Télé opération manuelle (sous image endoscopique, voire add fluorescence et US)	https://www.intuitive.com/en-us
	Ion	Endoscope robotisé flexible	Endoluminal (bronchoscopie)	Télé opération manuelle (dans image 3D from CT et image endo)	
Auris Health Inc / Johnson and Johnson.	Monarch Platform	Endoscope robotisé flexible	Endoluminal (bronchoscopie)	Télé opération manuelle (sous image endoscopique)	https://www.aurishealth.com/
Titan medical	SPORT	Deux instruments droites et une caméra amenée par un canal unique porté par un bras robotique unique	Laparoscopie single-port	Téléopération manuelle (2 "omégas")	https://titanmedicalinc.com/
TransEnterix	Senhance surgical system	multi-robots avec retour d'effort	Laparoscopie	Téléopération manuelle (instruments) et eye tracking (caméra)	https://transenterix.com/
CMR Surgical	Versus	multi-robots, instruments articulés	Coellio (general, colorectal, uro)	téléopération manuelle (sous image endoscopique)	https://cmsurgical.com/
MedRobotics	Flex robotic systems	Endoscope robotisé flexible - Follow-The-Leader	Endoluminal (head-and-neck, colorectal)	Téléopération manuelle (sous images endoscope) en approche	https://medrobotics.com/
Riverfield co. Inc.	Emaro	Robot pneumatique porte-endoscope	Coellio	Téléopération par mouvement de tête	https://www.riverfieldinc.com/en/
Canady life sciences	SR 70 robotic system	Système intégrant le porte endoscope (Viky EP), le porte manip utérin (Viky UP) et l'instrument articulé (Jaimy)	Coellio	téléopération par commande vocale pour Viky, télécommande manuelle pour Jaimy	https://www.usmedinnovations.com/products-technology/canady-robotics-sr-70-surgical-system/
Corindus Vascular (in Siemens)	CorPath GRX	Catheter robotisé	Endoluminal (Vasculaire and intra-coronaire)	téléopération manuelle (sous image radiologique)	https://www.corindus.com/
Hansen Medical (now Auris health in J&J.)	Magellan		Intravasculaire	inconnu	
	Sensei		Electrophysiologie	inconnu	
	Artisan	gaine de catheter active	intravasculaire	inconnu	
Stereotaxis	Niobe	deux aimants contrôlés par deux robots pour magnetic remote control of catheters	interventional radiology	inconnu	http://www.stereotaxis.com/
	Genesis	version light de la même chose	idem	inconnu	
	Vdrive	module de contrôle des catheters	idem	Téléopération manuelle (souris, joystick - sous image radiologique)	
Think Surgical	TCAT	préparation cavité osseuse - bras conventionnel associé à bras passif pour palpation de points - anciennement Robotdoc	orthopédie (hip and knee arthro)	Actif	https://thinksurgical.com/
Globus Medical Inc	Exelcius GPS	robot+navigation	Orthopédie (musculo-skeletal)	semi-actif (trajectoire droite)	https://www.globusmedical.co
Stryker	Mako robot	robot pour préparation cavité osseuse	Orthopédie (Knee arthro totale ou partielle et total hip)	Comanipulation	https://www.stryker.com/us/en/portfolios/orthopaedics/joint-replacement/mako-robotic-arm-assisted-surgery.html
	Acrobot	robot pour préparation cavité osseuse	orthopédie (knee TKA)	Comanipulation	
Corin group	Omnibot	robot+nav (aussi robot pour balance ligamentaire - balancebot) - on-bone	orthopédie (knee TKA)	Semi-actif (trajectoire plane)	https://www.coringroup.com/uk/solutions/omnibotics/
Smith & Nephew	Navio	perceuse augmentée + nav - contrôle de l'exposition de mèche selon le planning (retraction plutôt quand zone interdite)	Orthopédie (knee and hip?)	Comanipulation "simplifiée" (on/off)	https://www.smith-nephew.com/professional/microsites/navio/navio-technology/product-overview/
Medtronic	Mazor X stealth station	robot (bras)+nav (larger workspace as compared to Renaissance Mazor)	Orthopédie - vertèbre	semi-actif (trajectoire droite)	https://www.medtronic.com/us-en
	Cranial autoguide	robot (double platine XY) +nav instrument	Neurochirurgie	semi-actif (trajectoire droite)	
	Renaissance	robot parallèle - on-patient	Vertèbre et cranial	semi-actif (trajectoire droite)	rien sur la page de medtronic
Zimmer Biomet	Rosa	robot + navigation (éventuellement porte-endoscope cranial ou transnasal) (+frameless registration laser) et usage o-ct (spine)	Cranial (neuro et ORL) et vertèbre	Semi-actif (trajectoire droite) - mais possibilité d'ajouter un descendeur (actif) pour introduire implant cochléaire en ORL	https://www.medtech.fr/
Synaptive Medical	Modus V	robot porte optique opératoire (numérique,, high res) - bras standard - 3D/2D visu	neurochirurgie	Téléopération vocale	https://www.synaptivemedical.com/
Renishaw	Neuromate	robot (bras 6 axes) guide d'outil (drillier, electrodes, endoscope, etc.) + navigation	neurochirurgie stéréotaxique	Semi-actif (trajectoire droite)	https://www.renishaw.com
Brainlab	Criq	bras 7axes porte guide d'outil + navigation	neurochirurgie, vertèbre	semi-actif (trajectoire droite)	https://www.brainlab.com
Accuray	Cyberknife	bras porte-accelérateur, avec input images radio (2) et capture mouvement patient (polaris)	radiothérapie (radiochirurgie)	Actif avec adaptation à la position de la cible	
Axilum Robotics	TMS-robot	robot porte stimulateur magnétique + navigation - fauteuil intégré	psychiatrie, neurologie (stimulation magnétique transcraniale)	Actif avec adaptation à la position de la cible	http://www.axilumrobotics.com/
	TMS-cobot	idem mais bras léger - fauteuil séparé	idem	Actif avec adaptation à la position de la cible mais prépositionnement manuel	
GE	Discovery IGS 7 et IGS7 OR	robot porte X-ray	radiologie interventionnelle	Téléopération manuelle et macro-commandes automatiques	https://www.gehealthcare.com/products/interventional-image-guided-systems/igs-for-hybrid-or/discovery-igs-740-for-hybrid-or
Siemens	Artis Zeego	robot porte X-ray	radiologie interventionnelle	Téléopération manuelle et macro-commandes automatiques	
Interventional Systems	iSYS1	robot de ponction sous scanner (double plateforme X-Y)		semi-actif avec positionnement manuel (joystick) / automatique par planning	https://www.interventional-systems.com
Perfinth Healthcare	MAXIO	robot de ponction sous scanner	radiologie interventionnelle (ablation radio-fréquence)	semi-actif	http://www.perfinthhealthcare.com/
	ROBIO EX	? Pas clair	CT and CT&PET		
Soteria Medical BV	Soteria	robot de ponction sous IRM positionne un guide	prostate biopsie - endorectal	téléopération manuelle ou actif pour positionnement - biopsie manuelle	http://www.soteria-medical.com/
Biobot Surgical Pte Ltd	iSRobot MonaLisa	positionnement de guide d'aiguille sous image US 2D (reconstruction 3D pour planning) - deux points d'entrée	Prostate biopsie - transpérinéale	Semi-actif (trajectoire droite et butée)	https://biobotsurgical.com/
Procept BioRobotics	AquaBeam rob syst	dispositif portant un jet d'eau haute pression	urologie TURP	inconnu	https://www.procept-biorobotics.com/
Neocis	Yomi	robot (guidage haptique, visuel et sonore) - solidaire de position de la mâchoire ("sub")	implantologie dentaire	Comanipulation	https://www.neocis.com/
Venus Concept/restoration robotics	Artas IX et Artas	bras 7 axes plus outil spécifique intégrant caméra 3D High Res	prélèvement et implantation capillaire	Actif	https://artas.com/
CASination	HEARO	robot guidé par multi-capteurs	ORL (implants cochléaires)	actif contrôlé par multi-capteurs	https://www.cascination.com/
Collin Médical	RobOtol	robot RCM porte-endoscope et RCM porte-instrument	ORL (chirurgie de l'oreille moyenne)	téléopération manuelle ou actif (insertion électrode)	
XACT		5 dof image robot compatible-CT	interventional radiology, punctures	inconnu	https://xactrobotics.com/
Microbot Medical	Liberty	1 dof insertion plus control of the tip - système sur le patient, technologie jetable	cathererization, interventional radio,	Téléopération manuelle	https://microbotmedical.com/presentation-resources/