

LA ROBOTIQUE D'ASSISTANCE À LA CHIRURGIE : POURQUOI, ET COMMENT ?

À l'ère de la robotisation des tâches, la médecine présente une singularité : les variations anatomiques et de pathologies entre les patients font qu'elle ne peut être réduite à des gestes parfaitement reproductibles. Les actes chirurgicaux sont nécessairement individualisés, ils sont spécifiques à chaque patient. La robotique médico-chirurgicale est donc confrontée à cette difficulté qui fait que celle-ci se distingue fortement du reste de la robotique. Si les premières approches en robotique d'assistance chirurgicale se sont fortement inspirées de la robotique industrielle, des solutions de plus en plus dédiées sont soit déjà à l'œuvre dans les blocs opératoires soit à l'étude dans les laboratoires de recherche.

Par **Clément VIDAL** *

LA ROBOTIQUE AU SERVICE DU MINI-INVASIF ET DE LA PRÉCISION

La chirurgie est une discipline médicale spécialisée dans le traitement de maladies et de traumatismes qui

consiste à pratiquer manuellement, à l'aide d'instruments, des actes opératoires sur un corps vivant. Le succès d'une chirurgie demande avant tout non seulement de poser la bonne indication opératoire, mais aussi de réaliser le geste juste afin d'assurer l'efficacité thérapeutique tout en limitant les effets collatéraux. Sur ce dernier point, la discipline s'est attachée durant les dernières décennies à limiter l'invasivité des gestes chirurgicaux, notamment en réduisant la taille des incisions.

* Société Endocontrol.

Ainsi, par exemple, en chirurgie abdominale, les voies d'abord dites laparoscopiques consistent en la réalisation de plusieurs petites incisions abdominales, de 5 à 10 mm de longueur, remplaçant la traditionnelle incision large, dite laparotomie. Les instruments chirurgicaux sont introduits dans l'abdomen *via* ces incisions, ainsi qu'un endoscope muni d'un système d'éclairage et d'une caméra. Le chirurgien visualise la cavité abdominale par l'intermédiaire d'un écran vidéo situé à côté de la table d'opération, et non plus directement à travers l'incision. Cette technique chirurgicale a drastiquement réduit l'invasivité du geste, et donc la douleur associée, les cicatrices, la durée d'hospitalisation, le temps de repos nécessaire avant une reprise du travail... si bien qu'elle a largement remplacé la laparotomie pour de nombreuses indications. Néanmoins, ces voies d'abord laparoscopiques posent des problèmes inédits aux chirurgiens en limitant l'accès tant visuel que tactile aux organes à traiter. L'évolution de ces techniques minimalement invasives vers des indications de plus en plus complexes nécessite une adaptation de l'instrumentation. C'est dans ce contexte que la robotique a fait son entrée dans les blocs opératoires pour apporter la précision et la capacité de réaliser des gestes complexes dans un environnement contraint.

L'ÉVOLUTION DE LA ROBOTIQUE VERS UNE COMANIPULATION DITE « INTELLIGENTE »

Le terme robot provient du tchèque *robota* signifiant travail forcé (« corvée »). Il fut introduit en 1920 par le dramaturge Karel Čapek dans sa pièce de science-fiction intitulée R.U.R. (*Rossum's Universal Robots*).

La signification de ce terme a évolué au cours du temps, mais il continue à se caractériser par une importante polysémie. Il est intéressant de le souligner puisque la chirurgie bénéficie à plusieurs niveaux de ces différents aspects que peut prendre la robotique.

Un robot ménager est un bloc-moteur électrique combinable avec divers accessoires permettant d'effectuer plusieurs opérations culinaires. Plus généralement, un robot est un appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe, modifiable ou adaptable. Dans les œuvres de science-fiction, c'est une machine à l'aspect humain capable de se mouvoir, d'exécuter des opérations et de parler (robotique humanoïde).

De nos jours, les robots sont essentiellement utilisés en routine pour effectuer des tâches requérant une très grande précision ou pour travailler dans un environnement hostile.

Les robots chirurgicaux partagent les mêmes objectifs de précision : aider le chirurgien à réaliser des tâches précises selon un planning opératoire prédéfini. L'environnement « hostile » est en chirurgie le

corps du patient, le robot étant surtout utilisé pour la possibilité de pousser à l'extrême la miniaturisation de ses effecteurs, et donc d'opérer au travers d'incisions réduites.

À ce jour, la plupart des robots médicaux sont des machines qui ne présentent que peu ou pas du tout d'autonomie. Ce sont des systèmes dits « maître/esclave », reproduisant en direct les gestes du chirurgien. Mais en chirurgie comme dans d'autres applications, ces systèmes visent à devenir de plus en plus « intelligents », c'est-à-dire de plus en plus capables d'adaptation et d'autonomie.

L'histoire de la robotique chirurgicale a commencé dès 1985 avec l'utilisation du robot PUMA 560 (un système de manipulation initialement destiné à l'industrie), pour réaliser des biopsies requérant une grande précision, notamment en neurochirurgie.

Le premier robot à avoir obtenu l'autorisation de mise sur le marché aux États-Unis est le système AESOP. Il permettait au chirurgien de commander le positionnement motorisé d'une caméra endoscopique.

Toujours selon le même principe « maître/esclave », des systèmes robotiques ont ensuite été développés pour télé-manipuler des instruments de chirurgie (systèmes ZEUS et Da Vinci). L'idée première de ces systèmes était d'opérer à distance. Leurs programmes de recherche ont été financés par la NASA, puis par l'armée américaine. Cependant, l'opération Lindbergh, qui a vu une équipe chirurgicale située à New York opérer une patiente à Strasbourg en 2001, n'a pas trouvé d'écho dans la pratique courante, sans doute du fait qu'elle ne répondait pas à un besoin clinique réel.

Aujourd'hui, tous les chirurgiens qui utilisent ces robots le font dans la salle d'opération où se trouve le patient. Le principal intérêt de ces systèmes est de reproduire le mouvement de la main du chirurgien à l'intérieur de l'abdomen du patient au travers de mini-incisions. Par contre, ils ont l'inconvénient d'éliminer le retour haptique au chirurgien et d'exclure celui-ci du champ opératoire : il ne peut donc plus réagir rapidement et directement sur le patient.

Ces systèmes semblent avoir permis d'accélérer la démocratisation des voies d'abord mini-invasives (pour certaines indications comme la prostatectomie radicale [1] et l'hystérectomie), ce qui tend à prouver qu'ils facilitent réellement le geste pour le chirurgien. Cela a surtout été observé dans les pays qui se sont convertis tardivement à ces techniques chirurgicales, ce qui n'est pas le cas de la France. Néanmoins, ils n'ont encore montré leur supériorité clinique ni en termes d'efficacité (par exemple, dans le traitement carcinologique) ni en termes de réduction des complications opératoires, et ce quelles que soient les indications [2, 3, 4, 5, 6, 7].

Petit à petit, le robot est devenu un guide pour le chirurgien. Les systèmes Robodoc, puis Neuromate (*Integrated Surgical Systems Inc.*) ou RIO (*Mako Surgical Corp.*) en sont des exemples. Ces systèmes

présentent une double originalité : a) ils intègrent le principe de comanipulation (discuté ci-après) et, b) ils peuvent guider le chirurgien dans ses gestes, dépassant ainsi le simple stade du système « maître/esclave ».

La comanipulation désigne la réalisation de tâches par la combinaison d'actions mécaniques produites simultanément et de façon colocalisée par un utilisateur et un dispositif robotique. Ainsi, l'utilisateur, ici le chirurgien, et le bras robotique manipulent simultanément un instrument chirurgical. Cette approche permet au chirurgien de rester dans le champ opératoire, d'agir directement sur l'instrument quand il le souhaite, tout en profitant des capacités de la robotique à améliorer la dextérité, la stabilité, la force ou la précision d'un geste, ou encore à le sécuriser et à le faciliter. Elle pourrait donc être l'avenir de la robotique chirurgicale [8].

Au cœur de la problématique de conception de ces nouveaux systèmes se trouve la question de l'interac-

tion entre le robot chirurgical et l'opérateur. Les dispositifs existant à ce jour ont été développés pour la chirurgie orthopédique et la neurochirurgie. Dans ces deux disciplines, il existe des structures osseuses fixes et non déformables. Le chirurgien met au point un planning préopératoire du geste et le bras robotique se repère en peropératoire (pendant l'intervention chirurgicale) par rapport à ces structures osseuses afin de guider le chirurgien dans la réalisation du geste prédéfini.

Par contre, il n'existe pas de solution robotique de comanipulation au bloc opératoire pour les chirurgies de l'abdomen (digestive, urologique et gynécologique). Ces chirurgies sont appelées « chirurgies du mou », soulignant ainsi l'absence à proximité de la zone opérée de repères anatomiques fixes et non déformables susceptible de servir de repères communs au chirurgien et au robot. La robotique de comanipulation reste donc à développer dans ce domaine.



Photo©EndoControl

Photo 1 : Instrument robotique hybride tenu par le chirurgien et proposant des mobilités distales robotisées.

UN MARCHÉ FRANÇAIS DE LA ROBOTIQUE MÉDICALE DÉFICITAIRE

La balance commerciale de la France sur le marché de la robotique chirurgicale est fortement déficitaire.

La chirurgie laparoscopique a représenté un volume de 7,5 millions de procédures dans le monde en 2012 (source : *Global Industry Analysts / Laparoscopic devices Report 2013*) avec une croissance de 4 % dans les pays occidentaux et de 8 à 11 % dans les pays émergents (source : *Life Science Intelligence*). Le marché de la robotique d'assistance à la chirurgie a représenté environ 3,2 milliards de dollars dans le monde en 2013 et il devrait atteindre 20 milliards de dollars en 2019, selon *Winter Green Research*. En 2000, 1 000 opérations chirurgicales étaient effectuées en recourant à l'assistance robotique ; elles étaient plus de 500 000 en 2013.

La société *Intuitive Surgical Innovation* a à elle seule vendu, à ce jour, 75 systèmes robotiques Da Vinci en France, ce qui représente un coût total de 150 millions d'euros pour l'ensemble des structures de soin concernées. À cela s'ajoute le coût annuel en contrats de maintenance et en consommables, qui est évalué à 22,5 millions d'euros. Au vu de la forte progression du marché, ces chiffres pourraient être appelés à croître dans les années à venir.

DES CHALLENGES ET UNE OPPORTUNITÉ POUR LA FRANCE

Si l'avance prise par le système Da Vinci en matière de télémanipulation paraît difficile à rattraper sans un

investissement très significatif, il semble que s'engager à relever le challenge des systèmes de comanipulation pour la chirurgie abdominale peut être une voie intéressante. Heureusement, la France bénéficie dans ce



Photo©EndoControl

Photo 2 : Les robots de télémanipulation sont de plus en plus présents dans les blocs opératoires. Ici, les systèmes Da Vinci (Intuitive Surgical Inc.) et ViKY UP (EndoControl SAS). Ces systèmes permettent d'améliorer la stabilité, la dextérité, la force et la précision du geste opératoire.

domaine de laboratoires académiques d'excellence (ISIR, TIMC-IMAG, LIRMM, LSIIT, récemment regroupés dans le LABEX CAMI) et de quelques PME innovantes (EndoControl, MedTech) qui ont développé une expertise et un portefeuille de brevets novateurs. Dans cette optique, la société EndoControl a développé (en partenariat avec le laboratoire ISIR et le Pr. Brice Gayet de l'Institut Mutualiste Montsouris) un instrument robotique hybride nommé JAiMY [9].

À l'instar d'un instrument chirurgical traditionnel, cet instrument robotisé est tenu en main par le chirurgien, et non par un bras robotique. Il présente néanmoins des mobilités distales (intracorporelles) robotisées, que le chirurgien peut activer à partir de la poignée de l'instrument. Comme dans les solutions de télémanipulation, l'idée est d'utiliser la robotique pour reproduire dans l'abdomen les mobilités de la main du chirurgien à travers une incision de 5 millimètres seulement. Ainsi, tout en offrant une grande partie des avantages de la miniaturisation, à savoir la précision et la dextérité de la robotique traditionnelle, cette approche hybride permet de maintenir le chirurgien dans le champ opératoire tout en retrouvant un retour tactile perdu avec la télémanipulation.

Nous n'en sommes néanmoins qu'au début de l'exploration des riches possibilités qu'offre la comanipulation en chirurgie abdominale.

Par exemple, un bras de comanipulation pourrait permettre de stabiliser le geste du chirurgien quand celui-ci le souhaite, tout en étant totalement transparent

quand l'assistance robotique n'est pas utile. Le robot ne serait donc sollicité que lors des phases de l'intervention où il apporterait une réelle valeur ajoutée. Le chirurgien pourrait également dessiner une trajectoire ou une zone anatomique critique : le système robotique le guiderait, par la suite, selon cette trajectoire ou, à l'inverse, lui interdirait l'accès à des zones critiques. Le planning du chirurgien, réalisé en préopératoire pour des interventions sur des structures solides (telles que les os), pourrait alors être réalisé en peropératoire pour des interventions sur des structures molles (par exemple, l'abdomen).

L'étape suivante est de mettre à profit la puissance de calcul et la capacité des bases de données des systèmes robotiques en chirurgie. Le robot pourrait en effet avoir en mémoire toute l'imagerie préopératoire spécifique à un patient, ses résultats anatomopathologiques et biologiques, mais aussi des connaissances plus générales, comme le *process* opératoire recommandé. Il pourrait également prendre en compte les connaissances du chirurgien, en temps réel. Dans cette optique, le bras de comanipulation permettrait une interaction directe et bidirectionnelle avec le chirurgien. Il serait le vecteur de la transmission d'informations du chirurgien au robot et de la matérialisation des connaissances et du calcul du système robotique pour le chirurgien.

L'objectif est l'optimisation de la collaboration chirurgien/robot pour tirer le meilleur parti et des capacités humaines du chirurgien (connaissance de la pathologie, capacité d'adaptation, flexibilité...) et de la robotique (précision, stabilité, reproductibilité, puissance de calcul, base de données...), afin que le robot d'assistance devienne un compagnon de travail tour à tour guide du chirurgien et guidé par ce dernier.

Il est d'ailleurs intéressant de mettre en parallèle cette collaboration chirurgien/robot avec l'enseignement/apprentissage de la chirurgie. Le professeur de chirurgie tient la main de son élève pour le guider dans ses premiers gestes. Le chirurgien tiendra le bras robotique pour lui indiquer en temps réel des données spécifiques au patient, voire un planning peropératoire, le robot « tiendra la main » du chirurgien pour guider celui-ci dans la réalisation du geste optimisé calculé selon les informations fournies en temps réel par le chirurgien et selon les informations préopératoires provenant de sa base de données.

Enfin, à plus long terme, le robot chirurgical devra intégrer à la fois les technologies de comanipulation et les technologies de robotique autonome (le robot répète un geste appris, ou calcule et réalise son geste en fonction de paramètres extérieurs) afin de devenir un réel acteur de la stratégie thérapeutique travaillant en parallèle et en interaction avec le chirurgien.

Il semble légitime de penser que la France possède aujourd'hui les talents, la technologie et la propriété intellectuelle dont elle a besoin pour se lancer dans

cette aventure qui devrait lui permettre de regagner du terrain dans ce marché stratégique en forte croissance.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHANG (S.L), KIBEL (A.S), BROOKS (J.D.) & CHUNG (B.I.), "The Impact of Robotic Surgery on the Surgical Management of Prostate Cancer in the United States", *British Journal of Urology International* (BJU Int.), 23 juin 2014 (Doi : 10.1111/bju.12850).
- [2] SOTO (E.), LO (Y.), FRIEDMAN (K.), SOTO (C.), NEZHAT (F.), CHUANG (L.) & *al.*, "Total laparoscopic hysterectomy versus Da Vinci robotic hysterectomy: is using the robot beneficial?", in *Journal of Gynecologic Oncology*, 22, pp. 253-259, 2011.
- [3] NEZHAT (C.), LAVIE (O.), LEMYRE (M.), GEMER (O.), BHAGAN (L.) & NEZHAT (C.), "Laparoscopic hysterectomy with and without a robot: Stanford experience", *The Journal of the Society of Laparoendoscopic Surgeons (JSLS)*, 13, pp. 125-128, 2009.
- [4] SARLOS (D.) & KOTS (L.A), "Robotic versus laparoscopic hysterectomy: a review of recent comparative studies", *Curr Opin Obstet Gynecol*, 23(4), pp. 283-288, août 2001.
- [5] WRIGHT (J.D.), BURKE (W.M.), [...] & HERSHMAN (Dawn. L.), "Comparative Effectiveness of Robotic Versus Laparoscopic Hysterectomy for Endometrial Cancer", *Journal of Clinical Oncology*, 30(8), pp. 783-791, 10 mars 2012.
- [6] ROZET (F.), JAFFE (J.), BRAUD (G.), HARMON (J.), CATHELINÉAU (X.), BARRET (E.) & VALLANCIEN (G. A.), "A direct comparison of robotic assisted versus pure laparoscopic radical prostatectomy: a single institution experience", *The Journal of Urology*, 178 (2), pp. 478-482, août 2007.
- [7] KOUTLIDIS (N.), MOUREY (E.), CHAMPI-GNEULLE (J.), MANGIN (P.) & CORMIER (L.), "Robot-assisted or pure laparoscopic nerve-sparing radical prostatectomy: what is the optimal procedure for the surgical margins? A single center experience", *International Journal of Urology*, 19 (12), pp. 1076-1081, décembre 2012.
- [8] MOREL (G.), SZEWCZYK (J.) & VITRANI (M.A.), « Comanipulation », chapitre de l'ouvrage *Robotique Médicale*, Hermes publisher, Éditrice : J. Troccaz, pp. 343-392, 2012.
- [9] ZAHRAEE (A.H.), PAIK (J.K), SZEWCZYK (J.) & MOREL (G.), "Toward the development of a hand-held surgical robot for laparoscopy", *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* 15 (6), pp. 853-861.