



HAL
open science

Robotique interventionnelle : promesses, réalités et défis

Jocelyne Troccaz

► **To cite this version:**

Jocelyne Troccaz. Robotique interventionnelle : promesses, réalités et défis. Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, A paraître, 10.1016/j.banm.2024.10.004 . hal-04745600

HAL Id: hal-04745600

<https://hal.science/hal-04745600v1>

Submitted on 21 Oct 2024

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.

Robotique interventionnelle : promesses, réalités et défis

Robots for medical interventions: promises, realities and challenges.

Jocelyne Troccaz

Directrice de recherche Emérite, CNRS – Académie des Sciences, Académie de Chirurgie

Laboratoire TIMC, Pavillon Taillefer – Faculté de Médecine – Domaine de la Merci – 38706 La Tronche cedex – France

Revue générale – présentée en séance du 23 Avril 2024

Résumé :

La robotique interventionnelle utilisée en chirurgie, radiologie et cardiologie interventionnelles ou radiothérapie a incontestablement contribué à une évolution des pratiques cliniques depuis 4 décennies. Interface entre l'espace physique, où se situe le patient, et le monde numérique où sont stockées ses données, le robot a permis de matérialiser un planning préopératoire préparé sur une image tri-dimensionnelle et/ou de redonner de la dextérité dans des gestes de moins en moins invasifs dans des environnements anatomiques confinés et/ou distants. L'imagerie médicale multimodale, sans laquelle le robot est « aveugle » est venue redonner la capacité de voir une anatomie peu accessible et de contrôler le geste en temps réel. L'accès aux données peropératoires ouvre également la voie à des aides contextuelles utiles à l'opérateur novice ou pour une meilleure compréhension de ce qu'est le bon « geste » et sa quantification. Les défis scientifiques et technologiques pour le futur sont à chercher notamment dans la capacité à faire des robots intracorporels, à rendre compte d'une robotique dite continue (ou flexible) en interaction étroite avec l'anatomie et à repenser l'interaction humain-robot et le partage de décision entre l'un et l'autre. Au-delà de ces thématiques, nous évoquerons la difficulté du transfert industriel et ses conséquences sur l'existant offert au praticien.

Mots clés : robotique, ingénierie biomédicale, geste médico-chirurgical assisté par ordinateur

Abstract:

Interventional robotics used in surgery, interventional radiology and cardiology or radiotherapy has undoubtedly contributed to an evolution of clinical practices over the past 4 decades. Interfacing the physical space, where the patient is located, to the digital world where his data is stored, the robot made it possible to materialize a pre-operative plan prepared on a three-dimensional image and/or to restore dexterity in gestures less and less invasive in confined and/or remote anatomical environments. Multimodal medical imaging, without which the robot is "blind", has restored the ability to see an anatomy that is not easily accessible and to control the gesture in real time. Access to intraoperative data also opens the way to contextual aids useful to the novice operator or for a better understanding of what the right "gesture" is and its quantification. The scientific and technological challenges for the future are to be sought in particular in the capacity to make intracorporeal robots, to account for so-called continuous (or flexible) robotics in close interaction with anatomy. It requires also to rethink human-robot interaction and the sharing of decisions between one and the other. Beyond these themes, we will discuss the difficulty of industrial transfer and its consequences on the existing offering to the practitioner.

Keywords: robotics, biomedical engineering, computer-assisted medical and surgical interventions

Préambule

La robotique est utilisée dans de nombreux domaines touchant à la santé : elle peut assister un médecin dans la réalisation d'une intervention ou aider un patient dans une phase de rééducation ou encore suppléer un organe déficient ou un handicap moteur. Elle peut aussi contribuer à la logistique d'un hôpital par le transport ou la « manipulation » de patients, le transport de médicaments ou de repas ou être utilisée dans les services de stérilisation de l'instrumentation. Enfin, dans le contexte de la biologie, elle s'avère un outil de manutention efficace et rapide. Dans le cadre de cette communication, nous nous intéresserons uniquement aux robots utilisés par un médecin lors d'interventions.

1. 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 une personne ou on utilise le terme de « robot trader » pour nommer les logiciels d'achat/vente 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 pour y déplacer un effecteur (un « outil ») afin de réaliser une tâche. Mais le terme « robot » reste polémique dès lors qu'on parle d'une machine automatisée, préprogrammée, répétitive et sans aucune capacité d'adaptation. Transparaît donc la notion de *variabilité d'une tâche* et la nécessité d'une autoadaptation à celle-ci et à l'environnement dans lequel elle se déroule. 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 et du fait de l'unicité et de l'évolutivité de chaque situation opératoire. Mais pour que le robot soit capable d'adaptation, il faut qu'il puisse percevoir son environnement et ses changements éventuels. Il doit donc être associé à des capteurs internes ou externes. Dans le contexte médical c'est, par exemple, un capteur de force situé sur l'effecteur permettant de sécuriser l'action robotique mais cela peut être aussi des images endoscopiques peropératoires acquises par un autre dispositif. Pour pouvoir réagir à cette variabilité, il faut que l'information venant des capteurs soit traitée par des moyens informatiques. Dans le contexte présent, le robot est donc une machine physique équipée de capteurs, connectée à un ordinateur, et 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 et à l'environnement sera plus ou 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. Ces aspects feront l'objet de la section 4. Mais revenons tout d'abord aux travaux pionniers de la robotique interventionnelle.

2. Les débuts

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 [1]. A

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

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 [2] 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 [3] rapportait déjà une série de 83 procédures sur 78 patients ; les Proceedings de la Mayo Clinic décrivaient, en 1988 [4], 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 Mösges 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 grâce à l'information de position du bras et elle était visualisée en temps réel par rapport à une position 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 opératoire était calculé grâce à l'utilisation de quelques points anatomiques désignés dans les images et palpés sur le patient. Les équipes de Watanabe [5] et Mosges [6] rapportaient toutes deux les résultats relatifs à des séries d'une quinzaine de patients dans des publications de 1988. A Grenoble, en mars 1989, un premier patient était opéré grâce à l'assistance d'un robot par le Pr Alim Benabid [7,8] 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 Lavallée et Philippe Cinquin), puis par le système Neuromate², issu de l'industrialisation de ce concept.

Nous voyons donc dans ce bref retour aux pionniers du domaine, que l'abord mini-invasif des structures anatomiques de la tête, 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 environ quatre décennies, résultant des évolutions propres de nombreuses disciplines, dont la médecine et la chirurgie, et des grandes découvertes scientifiques et révolutions technologiques des 20^{ème} et 21^{ème} siècles, et de leur convergence.

3. 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 interventionnel est donc d'aider le médecin³ 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 1. Ce domaine a différents versants scientifiques et technologiques et couvre plusieurs disciplines. La recherche qui s'y pratique est donc pluri- et interdisciplinaire et est intrinsèquement translationnelle.

² Le système Neuromate dans une version modernisée est toujours distribué (cf. <https://www.renishaw.com/en/neurosurgery-products-and-systems--6332>)

³ Chirurgien, radiologue interventionnel, cardiologue interventionnel, radiothérapeute, etc.

Comme on l'a vu dans la section 2, l'imagerie y a une part prépondérante : aujourd'hui, plus que jamais, les équipes soignantes manipulent de très nombreuses informations issues de l'imagerie métabolique, anatomique ou même biologique. Le geste interventionnel lui-même est souvent conditionné à l'obtention de données peropératoires, souvent des images (endoscopiques, radiologiques, etc.). 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. Récemment, l'intelligence artificielle et l'accès à des données massives a redéfini les contours des traitements du signal et de l'image. Elle est un outil extrêmement prometteur de la détection/localisation « d'objets » (région anatomique, zone suspecte, instrument, etc.) et de la reconnaissance de pathologies. Il serait malgré tout illusoire de penser que tous les problèmes sont résolus.

La fusion d'information peut concerner également l'utilisation de données et de connaissances non spécifiques du patient traité mais utiles au geste : par exemple un atlas anatomique, un modèle biomécanique, des statistiques sur la forme d'un organe ou 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.

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 ; c'est un problème inverse de planification sous contraintes. Dans d'autres cas, des outils d'interaction avec le « patient numérique » - on parle désormais de « jumeau numérique » - permettront au clinicien de réaliser cette planification de façon interactive ; par exemple il définira et enregistrera une trajectoire de ponction à réaliser dans un organe ou le placement d'une vis intra-pédiculaire dans le rachis. 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 contraintes biomécaniques en chirurgie prothétique de la hanche ou du genou. Idéalement, une simulation permet non seulement de définir le geste mais peut aussi anticiper ses résultats fonctionnels [9]. La simulation peut également intervenir pour replanifier un geste durant une intervention par exemple pour prendre en compte le phénomène de « brainshift » [10] en neurochirurgie. Cela impose la capacité de percevoir les modifications anatomiques, de prendre en compte les paramètres tissulaires spécifiques du patient et de replanifier en un temps compatible avec l'intervention. Ceci pose de réels défis tant en termes de modèles que de méthodes et d'instrumentation. Dans ce domaine, l'Intelligence Artificielle peut aider à produire des modèles réduits appris dans une phase préopératoire [11]. Elle permet aussi de revisiter la planification notamment sous la forme de classification et reconnaissance de cas cliniques et d'inférence de plans patient-spécifiques à partir de bases de connaissances de cas passés [12,13]

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 introduites dans la section 2 : il s'agit des systèmes de navigation et des robots interventionnels. On compte aussi depuis quelques années les gabarits patient-spécifiques dont le principe fut introduit au milieu des années 90 [14]. Ce sont des guides de coupe personnalisés, généralement réalisés par impression 3D, destinés à remplacer, notamment en chirurgie orthopédique, les nombreux ancillaires

nécessaires à la réalisation de certains gestes. Ces guides matérialisent le planning dans le bloc opératoire mais leur domaine d'application est limité à la chirurgie osseuse.

4. L'assistance robotique

4.1 Un robot pour quoi faire ?

Les propriétés du robot potentiellement intéressantes dans le champ interventionnel sont multiples : sa précision (aller là où l'on veut), sa répétabilité (y retourner « indéfiniment » de façon identique), sa résolution (le plus petit mouvement réalisable et mesurable), la possibilité de contrôle des efforts, la possibilité de commande à distance. Son potentiel de miniaturisation ouvre également un champ applicatif immense. Mais son avantage et utilité première comme on l'a vu dans la section 2 est sa connexion avec l'information numérique (données de capteurs, données du patient, planning opératoire, etc.). C'est donc une interface privilégiée entre le monde numérique où sont stockées les informations et l'univers physique où se déroule la tâche.

De par ces propriétés, le robot semble particulièrement pertinent pour :

- 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.

Il est indispensable de rappeler que cette vision technologique de la tâche et de l'utilité du robot est à mettre au service d'un objectif clinique : par exemple améliorer la tenue d'une prothèse, améliorer le contrôle d'un cancer, limiter les effets secondaires d'une intervention ou d'un traitement, limiter l'irradiation de l'opérateur lors de gestes interventionnels sous rayons X, etc. La définition d'un service médical et sa démonstration sont des étapes clés conditionnant l'utilisation d'un dispositif médical, robotisé ou pas, en routine clinique.

4.2 Quel type d'assistance ?

Comme nous l'avons évoqué précédemment, différents niveaux d'automatisation du geste sont possibles : l'assistance allant d'une simple information donnée au médecin 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 revenons dans ce qui suit. Le type d'interaction humain-robot varie donc notablement. Afin d'en organiser la présentation, nous utiliserons le mode de contrôle des mouvements du robot par l'opérateur humain comme présenté dans [15] d'où est extraite l'illustration de la figure 2.

Pour une description plus exhaustive de la recherche et de l'existant en robotique médicale, nous invitons le lecteur intéressé à se reporter à un état de l'art plus complet de ce domaine par exemple [16]. Le numéro spécial des « Proceedings of IEEE » de Juillet 2022 [17] sur la robotique interventionnelle donne également une excellente vision du domaine. A noter enfin sur le versant

plus clinique, un rapport en français sur la chirurgie robotique publié par l'Académie Nationale de Chirurgie en 2020 accessible en ligne⁴.

a. Supervision :

A une extrémité du spectre, le mouvement est automatisé et il est supervisé par l'opérateur humain (cf. figure 2.a). On y trouve des robots préprogrammés en fonction de l'anatomie du patient : par exemple, Robodoc [18] qui usine une cavité osseuse prédéfinie sur le scanner pour une pose de prothèse ou plus récemment Hearo [19, 20] pour la pose d'implants cochléaires. Ces deux systèmes sont équipés de capteurs pour sécuriser le geste : le système Robodoc contrôle les efforts appliqués [21] tandis que le système Hearo, est équipé de multiples capteurs et monitoré la distance à des structures anatomiques critiques. Là où Robodoc nécessitait l'immobilité du patient, Hearo permet aussi de compenser de micro-déplacements du patient grâce à un capteur de position haute précision. Beaucoup plus rarement, on trouve des robots capables de mettre à jour le planning durant la tâche. Ainsi, le robot Cyberknife utilisé en radiothérapie est capable d'adapter, automatiquement, sa position en fonction de la respiration du patient [22] lors de l'irradiation d'une tumeur mobile du fait de celle-ci. Dans le cadre de la chirurgie laparoscopique de nombreux travaux ont été réalisés pour automatiser le placement robotisé d'un endoscope basé sur le suivi d'instruments (par exemple [23]) ou pour asservir le déplacement robotisé d'un instrument sur une cible mobile [24]. Ces approches mettent en œuvre des méthodes dites d'asservissement visuel.

Citons également des travaux récents relativement préliminaires visant l'automatisation complète de gestes sur tissus mous par exemple des anastomoses intestinales dans [25].

Cependant, parce que la pertinence de la mise à jour en temps réel d'un planning peut être très difficile à évaluer par un opérateur humain, ce type de systèmes soulève d'importantes questions de fiabilité et de sécurité.

b. Télé-opération :

A l'autre extrémité du spectre, le robot est télécommandé par l'opérateur humain au moyen d'une interface matérielle plus ou moins sophistiquée (cf. figure 2.b). En d'autres termes la position désirée de l'outil est transmise à chaque instant par l'utilisateur. Le plus souvent celui-ci perçoit l'environnement et la progression de la tâche par le biais images endoscopiques ou radiologiques, 2D ou 3D. Il existe parfois également un retour d'effort. Le mouvement proposé par l'opérateur peut être filtré ou mis à l'échelle avant d'être reproduit par la machine. Ce mode d'interaction avec le robot est utilisé majoritairement pour des gestes interventionnels mini-invasifs : chirurgie laparoscopique, radiologie ou cardiologie interventionnelles. Du porte-endoscope rigide AESOP contrôlé par la voix, développé au début des années 90 [26] il ne fallut qu'un pas pour transformer le robot en porte-instrument pour la laparoscopie avec le système ZEUS puis le système DaVinci et désormais toute une gamme de systèmes plus ou moins similaires. C'est un peu plus tardivement que les applications en cardiologie interventionnelle ont vu l'apparition de différents systèmes également télé-opérés facilitant l'introduction de cathéters et de dispositifs intravasculaires. L'avantage premier du robot téléopéré est de redonner de la dextérité à l'opérateur pour manipuler les instruments dans un espace confiné accessible par une voie d'abord extrêmement réduite. Le mettant à distance, il permet aussi de le protéger d'un rayonnement ionisant quand les gestes se font sous imagerie X.

c. Contrôle partagé :

⁴ Accessible sur <https://www.academie-chirurgie.fr/admin/uploads/media/photo/0001/05/0e1d3ee036f377372226387e133c71cd2d881645.pdf>

Enfin, un mode intermédiaire permet à l'opérateur et au robot de positionner ou déplacer conjointement un outil (cf. figure 2.c). Le planning informatisé est matérialisé par une contrainte physique générée par le robot pour imposer une trajectoire à suivre ou une zone à ne pas dépasser. On parle de systèmes semi-actifs ou de comanipulation. Ces deux termes ont été définis respectivement dans [27] et [28]) Dans ces systèmes, ce peut être l'architecture du robot elle-même qui contraint la tâche par exemple pour les RCM (Remote Center of Motion) (cf. [29] par exemple) ou pour le robot Neuromate mentionné précédemment. Cela peut également être par programmation⁵ que le robot positionne à chaque instant des « butées virtuelles » qui limitent les mouvements proposés par l'opérateur. On peut citer le système « Mako » développé pour l'aide à la pose de prothèses de genou unicompartimentales [31] Dans ce système, le robot contraint le chirurgien à rester dans les limites de la résection osseuse correspondant à la forme de l'élément prothétique à implanter. Au sein de la région permise le mouvement est non contraint.

Il faut noter que les 3 catégories ne sont pas complètement étanches : ainsi un mode de téléopération avancée permet d'envisager la compensation automatique d'un mouvement cardiaque [32,33] donnant au chirurgien l'impression d'opérer un organe fixe.

5. Evolutions technologiques des robots et directions futures

Depuis le premier robot chirurgical, il y a environ 40 ans, la technologie robotique a évolué : si les premiers exemplaires étaient des bras robotiques d'usage industriel 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 (par exemple [34,35] ou [36]) ou endo-corporels [37]. Si chacune de ces solutions apporte ses avantages et ses inconvénients de façon assez équilibrée, il apparaît clairement dans le rapport⁶ très complet produit par le Service Biomédical des Hôpitaux Universitaires de Genève fin 2023, que les dispositifs commercialisés à disposition des médecins reposent le plus souvent sur des architectures de bras robotiques assez classiques, à vocation plutôt généraliste (même si ces systèmes sont certifiés pour une application unique). Par ailleurs, comme le montre cet état des lieux des dispositifs robotisés « sur étagère », une très grande majorité d'entre eux sont des télémanipulateurs reproduisant le geste de l'opérateur ou des guides mécaniques imposant une trajectoire linéaire. Il est opportun de questionner cette déperdition d'innovation entre les prototypes quelquefois allant jusqu'à des validations précliniques ou cliniques et les produits existants [38].

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 [39] 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

⁵ Le terme de « cobot » ayant débouché sur la « comanipulation » a été introduit par les Pr Peshkin et Colgate de North Western University (USA) en 1995 mais la notion de contraintes programmables qu'il sous-tendait est plus ancienne et introduit dans différents papiers ou brevets au début des années 90 (cf. [30]).

⁶ Accessible en en ligne sur

https://www.hug.ch/sites/interhug/files/structures/service_dingenierie_biomedicale/CHIR/etatdelart_fr_20231222_light_compressed.pdf

ailleurs, de nombreux travaux récents concernent le domaine des robots continus [40] : à l'image un peu simpliste d'une trompe d'éléphant, un robot continu permet de s'introduire dans des espaces confinés et courbes pour y déplacer un instrument ou un capteur vers une position cible. Ces robots hyper-redondants peuvent donc prendre une infinité de formes 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. Ces dispositifs ouvrent la voie vers de nouvelles générations de robots patient-spécifiques (cf. [41]) Les applications potentielles des robots continus sont très nombreuses [42]. 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 [43,44].

Mais, au-delà des questions technologiques non triviales liées à ce nouveau type de robot, notamment pour ce qui concerne l'intégration de capteurs, les problématiques de modélisation constituent de réels défis. L'artillerie de la robotique « conventionnelle » basée sur des structures rigides avec un nombre fini d'articulations n'y suffit plus puisque ces dispositifs se déforment continuellement lorsqu'ils sont actionnés. Si les premiers travaux reposaient sur une formulation géométrique simplifiée de la structure déformable (courbure constante par morceaux), les travaux plus récents cherchent à résoudre la forme de la structure grâce à modèles issus de la mécanique des milieux continus ; ou bien c'est la relation entre des informations de capteurs et la forme qui est déterminée par des méthodes d'apprentissage sur de grosses masses de données expérimentales [45] Une présentation de ces problématiques de modélisation et de contrôle des robots continus peut être trouvée dans [46]. Par ailleurs, les dispositifs endoluminaux étant potentiellement au contact de l'anatomie, ils nécessitent le développement de modèles d'interaction robot-tissu biologique et l'identification des paramètres mécaniques tissulaires in-situ pour chaque patient. Ce défi en termes de modèle et de perception, est un passage obligé si l'on désire dépasser le mode de commande par télémanipulation qui est le standard en ce début 2024.

Pour conclure ces perspectives, il convient de revenir sur le lien aux images et plus généralement aux données. On l'aura compris, au-delà de l'assistance qu'il fournit, le système robotisé est un outil qui permet de collecter nombre de données sur les interventions qui sont réalisées, 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 d'assistances sensibles au contexte. Ainsi, un geste interventionnel 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 [47-49]. L'accès à des données annotées par des opérateurs experts constitue cependant un réel obstacle.

6. Du laboratoire au chevet du patient

La médecine irrigue et met au défi la recherche dans des domaines scientifiques et technologiques variés et les résultats de cette recherche, dans une boucle vertueuse, permettent de renouveler voire de réinventer les pratiques. Dans ce mouvement de fertilisation croisée très fécond, le domaine des GMCAO s'est fait une place significative depuis 4 décennies. Mais l'application clinique des travaux ne va pas de soi et, comme nous l'avons évoqué à demi-mots, peu de systèmes ont un destin clinique. Les raisons en sont multiples : outre la difficulté intrinsèque de la recherche, une idée

intéressante pour le chercheur n'est pas forcément une idée utile pour le médecin du point de vue d'un service médical rendu ; un système utile n'est pas forcément un système rentable pour les industriels et les investisseurs et évidemment le chemin est long, coûteux et parsemé d'embûches réglementaires pour aller du prototype au système marqué CE ou FDA. Il paraît cependant indispensable que ce continuum de la recherche scientifique à l'application clinique persiste pour permettre d'inventer la médecine de demain et pour ancrer cette recherche translationnelle dans son domaine d'application future. Plus que jamais le dialogue entre médecins, chercheurs et industriels est crucial.

Bibliographie

- [1] Kwoh YS., Hou J, Jonckheere E, Hayati S. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 1988; 35(2), 153–160.
- [2] Kall BA, Kelly PJ, Goerss SJ. Interactive stereotactic surgical system for the removal of intracranial tumors utilizing the CO2 laser and CT-derived database. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 1985;32(2), 112–116.
- [3] Kelly PJ, Kall BA, Goerss SJ, Earnest F. Computer-assisted stereotaxic laser resection of intra-axial brain neoplasms. *Journal of Neurosurgery*, 1986;64(3), 427–439.
- [4] Kelly PJ. Volumetric Stereotactic Surgical Resection of Intra-axial Brain Mass Lesions. *Mayo Clinic Proceedings*, 1988;63(12), 1186–1198.
- [5] Kosugi Y, Watanabe E, Goto J, Watanabe T, Yoshimoto S, Takakura Y, et al. An articulated neurosurgical navigation system using MRI and CT images. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 1988;35(2),
- [6] Mösges R, Schlöndorff G.. A new imaging method for intraoperative therapy control in skull-base surgery. *Neurosurgical Review*, 1988;11(3–4), 245–247.
- [7] Lavallée S, Cinquin P, Demongeot J, Benabid AL, Marque I, Djaid M., Computer Assisted Driving of a Needle into the Brain, Proceedings of CAR'89, Berlin, juin 89, Lemke H.U. ed., Springer-Verlag, 1989. p416–420.
- [8] Benabid AL., Lavallée S, Hoffmann D, Cinquin P, Demongeot J, Danel, F. Potential use of robots in endoscopic neurosurgery. In *Minimally Invasive Neurosurgery I* 1992. p. 93-97. Springer Vienna.
- [9] Picard MC, Cotton M, Briot N, Nazari MA., Poisbleau D, Perrier P, ... et al. Biomechanical model of the human face with a perspective of surgical assistance. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2023;26(sup1), S202-S204.
- [10] Morin F, Courtecuisse, H, Reinertsen I, Le Lann F, Palombi O, Payan Y et al. Brain-shift compensation using intraoperative ultrasound and constraint-based biomechanical simulation. *Medical image analysis*, 2017;40, 133-153.
- [11] Mendizabal A, Odot A, Cotin S. Deep learning for real-time computational biomechanics. In Cinesta F, Cueto O, Payan Y, Ohayon J (Eds). *Reduced Order Models for the Biomechanics of Living Organs* 2023; p. 95-126. Academic Press.
- [2] Lambrechts A, Wirix-Speetjens R, Maes F, Van Huffel S. Artificial intelligence based patient-specific preoperative planning algorithm for total knee arthroplasty. *Frontiers in Robotics and AI*, 2022; 9, 840282.

- [3] Feuilletré H, Auffret V, Castro M, Lalys F, Le Breton H, Garreau M et al. Similarity measures and attribute selection for case-based reasoning in transcatheter aortic valve implantation. *PloS one*, 2022;15(9), e0238463.
- [14] Radermacher K, Portheine F, Anton M, Zimolong A, Kaspers G, Rau G et al. Computer assisted orthopaedic surgery with image based individual templates. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 1998; 354, 28–38.
- [15] Nathoo N, Çavuşoğlu MC, Vogelbaum MA, Barnett GH. In touch with robotics: neurosurgery for the future. *Neurosurgery*, 2005; 56(3), 421-433.
- [16] Troccaz J, Dagnino G, Yang GZ. Frontiers of medical robotics: from concept to systems to clinical translation. *Annual review of biomedical engineering*, 2019;21, 193-218.
- [17] Taylor RH, Simaan N, Menciassi A, Yang GZ (Eds). Special issue on “Surgical Robotics and Computer-Integrated Interventional Medicine”, edited by Proceedings of the IEEE, 2022; 110(7).
- [18] Taylor RH, Paul HA, Mittelstadt BD, Glassman E, Musits BL, Bargar WL. Robotic total hip replacement surgery in dogs. In *Images of the Twenty-First Century. Proceedings of the Annual International Engineering in Medicine and Biology Society*, 1989, p. 887-889. IEEE.
- [19] Weber S, Gavaghan K, Wimmer W, Williamson T, Gerber N, Anso, J et al. Instrument flight to the inner ear. *Science robotics*, 2017;2(4), eaal4916.
- [20] Topsakal V, Heuninck E, Matulic M, Tekin AM, Mertens G, Van Rompaey et al. First study in men evaluating a surgical robotic tool providing autonomous inner ear access for cochlear implantation. *Frontiers in Neurology*, 2022;13, 804507.
- [21] Kazanzides P, Zuhars JF, Mittelstadt BD, Taylor RH. Force sensing and control for a surgical robot. In Proceedings of *ICRA 1992*. p. 612-617, IEEE.
- [22] Schweikard A, Shiomi H, Adler J. Respiration tracking in radiosurgery. *Medical Physics*, 2004;31(10), 2738–2741.
- [23] Voros S, Long JA, Cinquin P. Automatic detection of instruments in laparoscopic images: A first step towards high-level command of robotic endoscopic holders. *The International Journal of Robotics Research*, 2007; 26(11-12), 1173-1190.
- [24] Krupa A, Gangloff J, Doignon C, De Mathelin MF, Morel G, Leroy et al. Autonomous 3-D positioning of surgical instruments in robotized laparoscopic surgery using visual servoing. *IEEE transactions on robotics and automation*, 2003; 19(5), 842-853.
- [25] Saeidi H, Opfermann JD, Kam M, Wei S, Léonard S., Hsieh MH et al A. Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis. *Science robotics*, 2022; 7(62), eabj2908.
- [26] Sackier JM, Wang Y. Robotically assisted laparoscopic surgery: from concept to development. *Surgical endoscopy*, 1994 ;8, 63-66.
- [27] Lavallée S. *Gestes médico-chirurgicaux assistés par ordinateur : application à la neurochirurgie stéréotaxique*. Thèse de Doctorat de Sciences de l’Université de Grenoble , 1989. (<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00335578>)
- [28] Morel G, Szewczyk J, Vitrani MA. Comanipulation. In Troccaz J, Ed. *Medical Robotics*, 2012; 303-350. Wiley
- [29] Taylor RH, Funda J, Eldridge B, Gomory S, Gruben K, LaRose D et al. A telerobotic assistant for laparoscopic surgery. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 1995;14(3), 279-288.
- [30] Troccaz J, Peshkin M, Davies B. Guiding systems for computer-assisted surgery: introducing

synergistic devices and discussing the different approaches. *Medical Image Analysis*, 1998; 2(2), 101-119.

- [31] Roche M. Robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty: the MAKO experience. *The Orthopedic clinics of North America*, 2015;46(1), 125-131.
- [32] Ruszkowski A, Schneider C, Mohareri O, Salcudean S. Bimanual teleoperation with heart motion compensation on the da Vinci® Research Kit: Implementation and preliminary experiments. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2026*; p. 4101-4108. IEEE.
- [33] Cheng L, Tavakoli M. Neural network-based physiological organ motion prediction and robot impedance control for teleoperated beating-heart surgery. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021; 66, 102423.
- [34] Berkelman P, Boidard E, Cinquin P, Troccaz J. LER: The light endoscope robot. In *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)(Cat. No. 03CH37453) 2003*; Vol. 3, p. 2835-2840. IEEE.
- [35] Long JA, Tostain J, Lanchon C, Voros S, Medici M, Descotes JL et al. First clinical experience in urologic surgery with a novel robotic lightweight laparoscope holder. *Journal of Endourology*, 2013; 27(1), 58-63.
- [36] Shoham M, Lieberman LH, Benzel EC, Togawa D, Zehavi E., Zilberstein B et al. Robotic assisted spinal surgery—from concept to clinical practice. *Computer Aided Surgery*, 2007;12(2), 105-115.
- [37] Patronik NA, Ota T, Zenati MA, Riviere CN. A miniature mobile robot for navigation and positioning on the beating heart. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009; 25(5), 1109-1124.
- [38] Fichtinger G, Troccaz J, Haidegger T. Image-guided interventional robotics: Lost in translation? *Proceedings of the IEEE*, 2022; 110(7), 932-950.
- [39] Pfeil A, Cazzato R, Barbé L, De Marini P, Chiang JB, Garnon J et al. Robotically Assisted CBCT-Guided Needle Insertions: Preliminary Results in a Phantom Model. *CardioVascular and Interventional Radiology*, 2019; 42, 283–288.
- [40] Dupont PE, Simaan N, Choset H, Rucker C. Continuum robots for medical interventions. *Proceedings of the IEEE*, 2022; 110(7), 847-870.
- [41] Pedrosa FC, Feizi N, Zhang R, Delaunay R, Sacco D, Jagadeesan J et al. On surgical planning of percutaneous nephrolithotomy with patient-specific CTRs. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention 2022*; p. 626-635. Cham: Springer Nature Switzerland.
- [42] Alfalahi H, Renda F, Stefanini C. Concentric Tube Robots for Minimally Invasive Surgery: Current Applications and Future Opportunities. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2020;1–1.
- [43] Chautems C, Zeydan B, Charreyron S, Chatzipirpiridis G, Pané S, Nelson BJ. Magnetically powered microrobots: A medical revolution underway? *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 2017; 51(3), 405–407.
- [44] Nelson BJ, Gervasoni S, Chiu PW, Zhang L, Zemmar A. Magnetically actuated medical robots: An in vivo perspective. *Proceedings of the IEEE*, 2022; 110(7), 1028-1037.
- [45] Yu X, Jia Z, Qian S, Wang D. Data-Based Shape Self-Sensing of a Cable-Driven Notched Continuum Mechanism Using Multidimensional Intrinsic Force Information for Surgical Robot. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2024; 16, 071002-1.

- [46] Chikhaoui MT, Rosa B. Modeling and control strategies for flexible devices. In *Endorobotics 2022*. P. 187-213. Academic Press.
- [47] Maier-Hein L, Vedula SS, Speidel S, Navab N, Kikinis R, Park A, et al. Surgical data science for next-generation interventions. *Nature Biomedical Engineering*, 2017; 1(9), 691–696.
- [48] Derathé A, Reche F, Moreau-Gaudry A, Jannin P, Gibaud B, Voros S. Predicting the quality of surgical exposure using spatial and procedural features from laparoscopic videos. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2020; 15(1), 59–67.
- [49] Pedrett R, Mascagni P, Beldi G, Padoy N, Lavanchy JL. Technical skill assessment in minimally invasive surgery using artificial intelligence: a systematic review. *Surgical endoscopy*, 2023;37(10), 7412-7424.

Figures

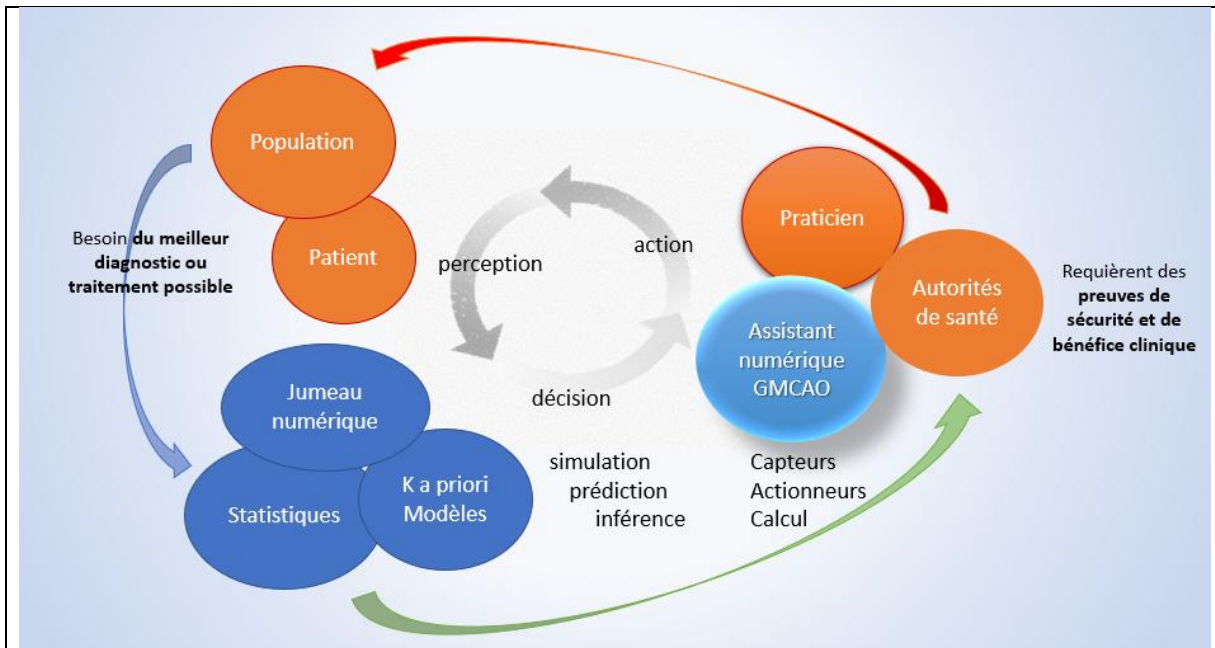


Figure 1 : Problématique générale du Geste Médico-Chirurgical Assisté par Ordinateur

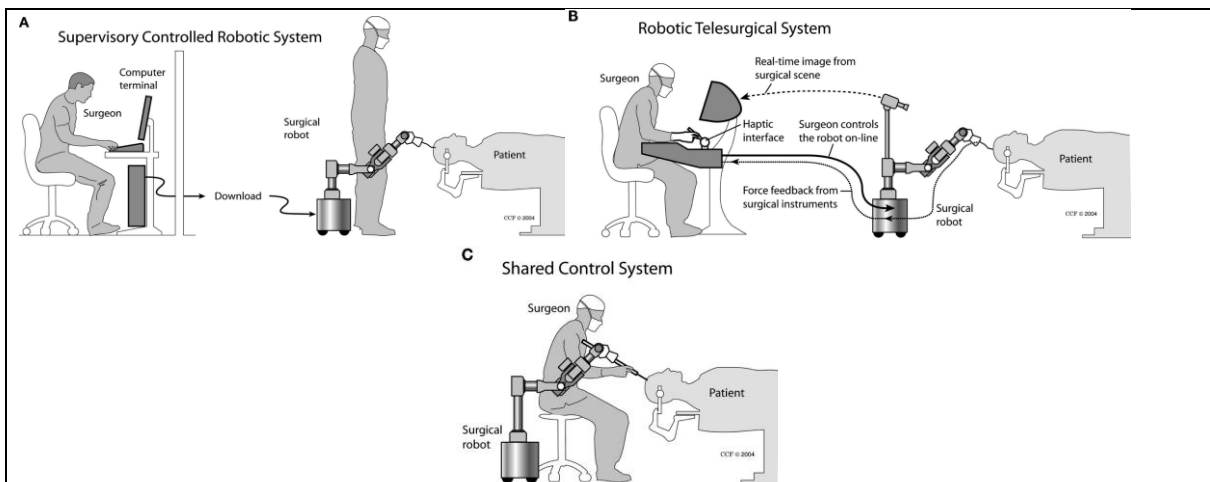


Figure 2 : Trois types d'interaction humain-robot : (a) supervision, (b) télé-opération, (c) contrôle partagé (illustration extraite de [15])