



**HAL**  
open science

## Méthode de conception optimale de robots médicaux

Laurence Nouaille, Natalie Smith-Guérin, Gérard Poisson

► **To cite this version:**

Laurence Nouaille, Natalie Smith-Guérin, Gérard Poisson. Méthode de conception optimale de robots médicaux. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. <hal-03360143>

**HAL Id: hal-03360143**

**<https://hal.science/hal-03360143v1>**

Submitted on 30 Sep 2021

**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.



HAL Authorization

## Vers une méthodologie de conception de robots médico-chirurgicaux

Laurence Nouaille, Natalie Smith-Guérin, Gérard Poisson

Laboratoire Vision et Robotique  
63 Avenue de Lattre de Tassigny, 18020 Bourges Cedex  
Tél. : 02 48 23 84 70  
E-mail : Laurence.Nouaille@bourges.univ-orleans.fr

### Résumé :

*Dans cet article nous proposons une démarche pour aider au choix de conception de robots pour des applications médicales. A partir d'une étude menée sur des robots existants, nous analysons les cahiers des charges d'applications médicales différentes afin de déterminer les contraintes prépondérantes pour la conception des robots. Puis, nous nous intéressons à la phase de synthèse topologique des mécanismes. Une analyse statistique élaborée à partir de la classification des robots nous permet de retenir une famille de topologies qui constitue une base de solutions pour la conception mécanique de robots médicaux. Nous énonçons un ensemble de règles établissant une relation entre une contrainte de type « cahier des charges » et une caractéristique topologique de la cinématique. L'organigramme proposé constitue un outil pour l'aide à la conception de robots médicaux.*

### Abstract :

*In this paper, we suggest a way to help choosing a design of medical robots. Thus, we proceed in three phases. First, studying medical robots, we analyse the specifications of different medical applications to find the dominating constraints for the design. Secondly, we realise a classification based on the robots kinematics structure. A statistic analyse shows us a whole of existing topology, a base for the design of medical robots. Then, we create an algorithm which connects constraints of specifications and robots topologies.*

**Mots-clefs : synthèse de mécanismes ; conception optimale ; robots médico-chirurgicaux.**

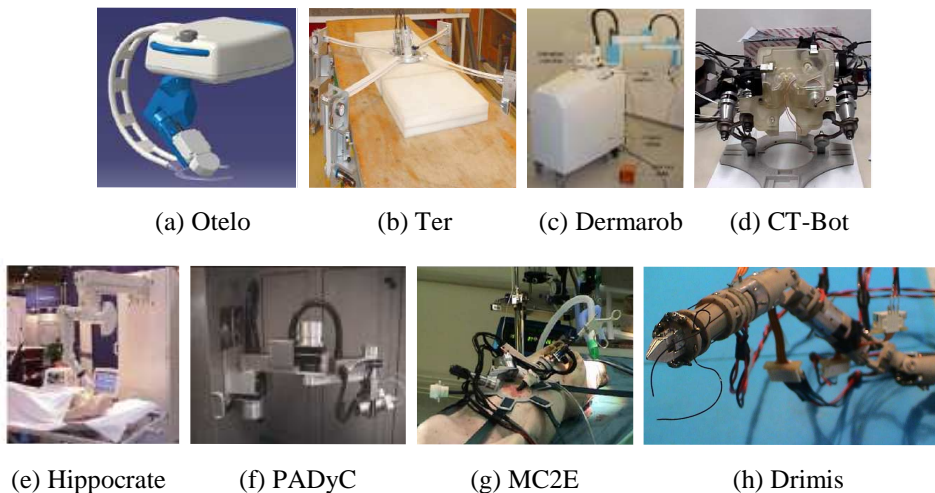
## 1 Introduction

La robotique médicale est une discipline récente : le premier grand projet français de robotique médicale, « *Spartacus* », a commencé en 1975. Il a permis de développer plusieurs versions de robots télé-opérés d'assistance aux tétraplégiques. Depuis, divers prototypes de robots médicaux ont été réalisés : leurs capacités et performances ont notablement progressé et parallèlement leurs architectures cinématiques se sont transformées. Après avoir utilisé des robots industriels adaptés au besoin médical, on se dirige de plus en plus vers la conception de robots dédiés à des tâches spécifiques dans des secteurs variés. Les travaux de recherche portant sur la conception mécanique des robots médicaux sont récents. Divers auteurs se sont intéressés aux structures cinématiques rencontrées en robotique médicale : Pierrot (2003), Poignet *et al* (2005). Cependant la synthèse de mécanismes, pour ce secteur d'application, n'a pas fait l'objet de publications majeures. La difficulté est largement expliquée par la relative « jeunesse » de la discipline et par le fort degré de risque associé au secteur chirurgical. On n'a pas encore à ce jour le recul et l'expérience suffisante pour établir des règles strictes en matière de conception robotique pour le médical et les systèmes réalisés sont souvent restés au stade de prototype expérimental. Un outil d'aide à la conception serait ainsi utile et largement apprécié.

Nous avons ainsi travaillé à la recherche d'une méthode de conception de robots médicaux. Nous avons procédé en trois phases : 1) étude de cahiers des charges de robots développés pour des applications médicales différentes 2) élaboration d'un catalogue de robots médicaux constituant une base pour la synthèse topologique 3) proposition de règles et d'organigrammes traduisant des relations entre des contraintes du cahier des charges et une structure cinématique de robots.

## 2 Etude de « Cahiers des charges » en robotique médicale.

Nous avons tout d'abord étudié les cahiers des charges de robots dans différents domaines d'applications pour avoir une vision globale des contraintes de conception de ces mécanismes. Nous avons plus particulièrement analysé les cahiers des charges des robots représentés FIG 1, dont les caractéristiques figurent essentiellement dans les thèses citées en bibliographie.



**FIG 1** – Les robots retenus pour l'étude du « Cahier des charges ».

- Les robots Otelo et Ter sont tous les deux des robots de télé-échographie de conceptions très différentes, Al Bassit (2005) , Vilchis (2003). Ce sont des dispositifs maître-esclave permettant de réaliser une échographie sur un patient distant.
- Le robot Dermarob permet d'effectuer un prélèvement de peau sur un patient à l'aide d'un « dermatome » pour la chirurgie réparatrice des grands brûlés, Duchemin (2003).
- Le robot Ct-Bot guide l'insertion d'aiguille dans le corps du patient pour réaliser une biopsie ou un traitement médicamenteux sous imagerie scanner, Maurin (2005).
- Le robot Hippocrate réalise une échographie dans le but de disposer d'une représentation 3D des artères carotidiennes, Pierrot *et al* (1999).
- PADyC est un robot passif utilisé en chirurgie cardiaque ou orthopédique, il restreint les mouvements du chirurgien pour éviter les zones à risque, Chavanon (2003).
- MC2E permet de manipuler un endoscope au travers d'un trocart en chirurgie mini-invasive, Zemiti (2005).
- Drimis est un outil de chirurgie mini-invasive, il apporte des mobilités intra-cavitaires supplémentaires, Sallé (2004).

Bien que ces applications soient spécifiques, on peut cependant remarquer que les cahiers des charges correspondants ont de nombreux points communs.

Les robots doivent permettre d'assurer un bon suivi du geste médical, ils possèdent donc 6 ddl pour la plupart d'entre eux. Les robots développés pour la chirurgie mini-invasive n'ont besoin

que de 4 ddl pour la partie située avant le passage du trocart. Selon l'application médicale considérée, ils doivent soit suivre une trajectoire modélisée, soit suivre une trajectoire continue sans rencontrer d'obstacles, soit avoir un mouvement autour d'un point fixe.

Le respect de cette première contrainte est toujours associé à des conditions de sécurité impératives qui peuvent être classées en deux catégories. La première est le respect de l'environnement du robot : celui-ci ne doit pas entrer en collision avec des personnes (soignants ou patient) ou du matériel médical. Il doit être rapidement installé et facilement déplaçable. La seconde est le respect des conditions d'aseptie du matériel en contact avec le patient ou situé dans un bloc opératoire. Pour cela, le matériel est soit stérilisé en autoclave, soit enveloppé par un plastique stérile, soit conçu avec des éléments à usage unique.

Certaines applications médicales comme la télé-échographie ou l'insertion d'aiguille imposent que le robot utilisé soit compact et léger pour être facilement transportable ou portable par une personne. D'autres, imposent que le robot soit massif pour augmenter la stabilité (PADyC).

Pour ce qui est des contraintes mécaniques nécessaires à la réalisation de la tâche médicale, nous remarquons qu'il faut, pour la plupart des applications étudiées, pouvoir exercer des efforts de l'ordre de 20 N. L'action de prélèvement de peau et l'orthopédie nécessitent un effort parfois plus important (100 N). A l'opposé, l'outil de chirurgie mini-invasive exercera un effort maximum de 1 N.

Les valeurs des grandeurs cinématiques sont quant à elles fortement liées à l'application : dans le domaine de la télé-échographie la sonde a une vitesse maximale de 30 mm/s et une vitesse angulaire de 0,5 rad/s ; pour le prélèvement de peau, le dermatome doit se déplacer entre 2 mm/s et 10 mm/s ; pour la réalisation d'échographie d'artères carotides la vitesse est de 10 cm/s.

Le robot médical doit aussi avoir de bonnes capacités de parcourabilité et de manipulabilité dans son espace de travail obligatoire, pour le suivi du geste médical. Il doit respecter des contraintes d'encombrement sous des conditions de sécurité environnementales du robot et d'aseptie. Les actionneurs choisis doivent être de puissance limitée pour assurer la sécurité des patients.

Cette analyse nous permet de mettre en évidence les contraintes de conception communes à toutes les applications médicales et les contraintes supplémentaires qui dépendent de la tâche désirée. Les contraintes de conception sont, dans la plupart des applications, l'accessibilité à l'espace de travail sans singularité et la limite imposée par les butées articulaires pour assurer la sécurité. Dans la phase d'optimisation dimensionnelle, ceci se traduit par la limitation des espaces des variables de conception ou par l'interdiction de certaines valeurs dans les objectifs.

Les critères de conception permettent de qualifier les performances attendues du robot. On retiendra la manipulabilité, la parcourabilité sur une trajectoire, la répétabilité, la masse, la compacité ou l'encombrement, la précision : la distance aux organes (sécurité) ou la distance par rapport à la trajectoire pré-opératoire.

### 3 Catalogue de robots médicaux.

Nous réalisons ici la synthèse topologique des robots médicaux, deuxième « sous problème » de la synthèse de mécanismes, Chedmail *et al* (1998). Nous présentons les architectures qui permettent de réaliser une tâche médicale. Nous avons dressé un catalogue de 60 dispositifs classés par domaine médical. Ce catalogue est basé sur la cinématique et la réalisation technologique de ces robots. Nous nous sommes intéressés à leur architecture, leur nombre de ddl, la morphologie du porteur et du poignet et la description de la chaîne cinématique. Nous avons plus particulièrement étudié les réalisations technologiques des poignets à centre de rotation déporté (RCM). Une analyse statistique a été menée à partir de cette classification, Nouaille *et al* (2006). Elle montre la répartition des robots par domaine médical : ceux de chirurgie mini-invasive représentent 30 % de la population étudiée, ceux de neurochirurgie, d'orthopédie, d'échographie, de ponctions et de radiothérapies 15 %. Nous avons aussi analysé

la répartition des structures. Les robots série sont les plus nombreux (61%). Les robots parallèles (24%) utilisés en robotique médicale sont de types Delta ou plate-forme de Stewart. La structure parallèle possède un rapport effort exercé/masse du robot plus intéressant qu'un robot série. Elle offre plus de rigidité et de compacité, et une bonne précision absolue mais elle possède un mauvais rapport empreinte au sol/espace de travail et ne permet qu'un faible débattement angulaire, ce qui est gênant pour la majorité des applications médicales. Elle est aussi plus difficile à mettre en œuvre d'un point de vue commande que la structure série.

Pour les architectures série, les structures porteuses classiques représentent plus de la moitié des solutions. La structure Scara apporte un bon compromis entre l'espace de travail et la robustesse. Son espace de travail cylindrique est plus adapté, pour une utilisation au dessus du patient allongé, que celui de la structure anthropomorphe qui est sphérique. Elle est également plus sûre, les effets de la gravité sont plus faciles à prendre en compte. Par contre son rapport effort exercé / masse du robot est de 10 ce qui entraîne pour des capacités de charges importantes une augmentation de la taille des actionneurs. C'est pour cela que dans le domaine de l'orthopédie où il faut que le robot exerce des efforts relativement importants, on utilise plutôt des robots de type anthropomorphe.

Certains robots n'ont pas de porteur, ils sont soit attachés au patient, notamment pour compenser les mouvements physiologiques soit tenus par un assistant pour éviter le développement de solutions lourdes et encombrantes.

Pour ce qui est des structures du poignet, 80% sont à centre de rotation distant de type Série et une minorité sont de type non concourants. Ces derniers sont peu utilisés car la commande cartésienne est alors problématique. L'importante part de poignets RCM est due à la contrainte des robots de chirurgie mini-invasive qui doivent passer par un point fixe et des robots d'échographie qui doivent faire pivoter la sonde autour du point de contact de la sonde sur la peau du patient. Les technologies les plus utilisées pour réaliser le RCM sont en proportions égales de type sphériques actifs ou parallélogrammes. Certains robots utilisent des guides circulaires. Les structures sphériques sont plus compactes mais plus difficiles à réaliser. Elles ont l'inconvénient de présenter des configurations singulières. Les deux autres solutions ont des architectures redondantes qui permettent d'augmenter la dextérité de l'organe terminal et d'éviter les collisions, par contre elles sont plus lourdes et moins compactes. Le RCM passif à poignet à articulation passive (PAP) est un peu moins utilisé du fait de son manque de précision et de répétabilité. Le RCM réalisé par une loi de commande est une solution proposée par Michelin (2003). L'étude du nombre de degrés de liberté des robots a montré que plus de la moitié des robots a au moins 6 ddl et un tiers a 3 ou 4 ddl.

Cette analyse nous a permis de déterminer les variables de conception non évaluées suivantes : l'architecture du robot et la nature des articulations à partir d'un catalogue de robots médicaux.

#### **4 De l'expression du besoin à la solution proposée**

Dans cette partie, nous établissons des liens entre l'expression du besoin exprimé dans le cahier des charges pour réaliser la tâche médicale et la morphologie du robot choisie. Cette analyse est menée à partir des conceptions des robots existants dans notre catalogue (60 dispositifs). C'est un raisonnement par énumération et adaptation des cas les plus proches appelé *étude de raisonnement par cas*.

Nous avons pu constater que les robots conçus jusqu'alors sont dans la majorité des cas, modifiés en fonction du besoin, à partir de solutions existant dans le laboratoire ou dans l'entreprise conceptrice. Ter, LPR et Ler du laboratoire TIMC utilisent tous deux des guides circulaires pour réaliser le RCM ; les robots Aesop et Zeus de Computer Motion ont le même porteur Scara; la conception d'Hippocrate a aidé à celle de Dermarob au LIRMM ; Teresa, Otelo 1 et 2 au LVR ont tous un poignet sphérique pour réaliser le RCM. Partant de cette observation, nous pouvons préconiser a priori des solutions fiables qui ont déjà largement été

utilisées dans diverses applications. Les solutions de structure série classique anthropomorphe ou Scara peuvent être retenues si la contrainte d'encombrement limité ou celle de la masse faible (moins de 5kg) n'apparaît pas dans le cahier des charges. Sinon, on choisira la solution de ne pas utiliser de porteur en « attachant » le robot au patient ou en faisant maintenir le robot par une personne. Si les capacités d'efforts ne sont pas importantes (quelques N), et si on a besoin d'une bonne précision du robot ( $< 1$  mm), on choisira une structure parallèle. Le robot anthropomorphe sera préféré au robot de type Scara lorsque l'application médicale nécessite une grande mobilité et des efforts importants (100 N environ). Les manipulateurs Scara commercialisés sont en général de taille moyenne (capacité de charge 1kg, envergure 80cm). Le choix du poignet sera fait en fonction de la contrainte de mouvement autour d'un point fixe. Si cette contrainte existe, il faut choisir un poignet à centre de rotation déporté (RCM). Si on n'a pas besoin d'une très grande précision on choisira un poignet à articulations passives, sinon un poignet RCM de type parallélogramme ou poignet sphérique ou guide circulaire. La solution parallélogramme est la plus simple à mettre en œuvre, elle sera choisie s'il n'y a pas de contrainte d'encombrement restreint. La solution du guide circulaire a l'inconvénient d'avoir un rendement moindre par rapport à la solution sphérique mais est plus simple à réaliser et n'apporte pas de singularité dans l'espace de travail. Si la contrainte n'existe pas, on pourra choisir un poignet à axes non concourants. Nous avons traduit ces réflexions par une suite de propositions de type (si  $A \Rightarrow \lambda$ ) où  $A$  est l'expression d'une combinaison booléenne de contraintes du cahier des charges et  $\lambda$  est une caractéristique de la morphologie choisie, ex : si  $((E < 500^3 \text{ mm}^3 \cdot m < 5 \text{ kg}) \cdot (p > 1 \text{ mm}) \Rightarrow \text{Pas de porteur})$ . Ces propositions ont été regroupées dans les organigrammes de choix de morphologie FIG 2.

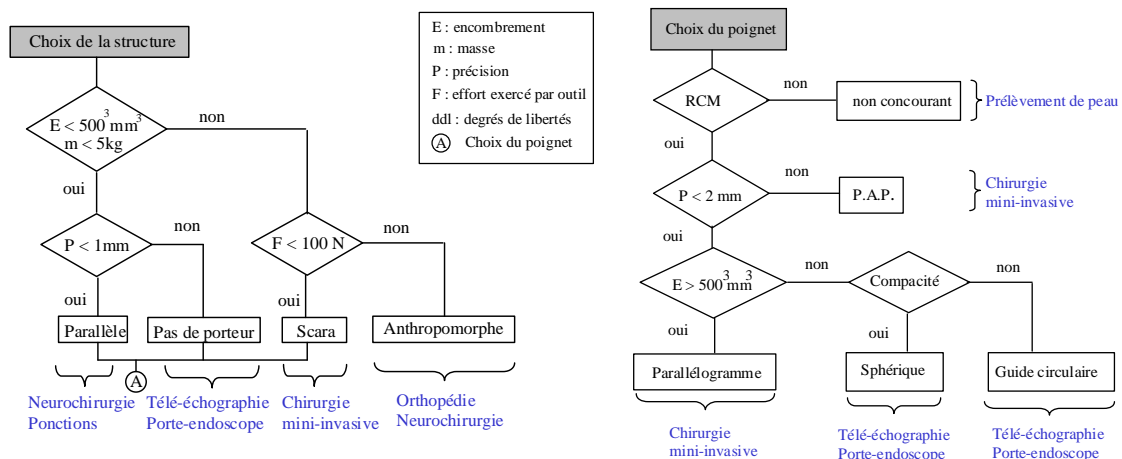


FIG 2 – Organigrammes de choix de morphologie de robot médical

La synthèse topologique permet alors de choisir une morphologie de robot. Pour répondre à l'ensemble des contraintes du cahier des charges, il faut poursuivre l'étude de conception par une synthèse dimensionnelle pour déterminer toutes les variables de conception du robot ou éventuellement permettre le choix entre deux structures candidates.

## 5 Conclusion et perspectives

Les recherches portant sur la conception optimale de structures robotiques pour le médical sont récentes et le besoin d'un outil d'assistance au concepteur est certain, notamment en matière de synthèse topologique de mécanismes. S'inscrivant dans cet objectif, nous avons présenté dans cet article, deux phases d'un problème de synthèse de mécanismes. Concernant la première

phase, nous avons analysé les cahiers des charges de 8 robots médicaux différents. Cela nous a permis de mettre en évidence les contraintes de conception communes à tous les robots, et celles spécifiques en fonction de l'application médicale, ainsi que les critères de conception qui traduisent les performances attendues du robot. Nous avons ensuite, dans la seconde phase, élaboré un catalogue de 60 robots médicaux afin d'étudier leur structure cinématique et nous avons établi les liens entre l'expression des besoins exprimés dans les cahiers des charges et le choix des solutions figurant dans le catalogue. La démarche que nous proposons pour le choix de morphologies de robots s'avère être valide pour 85 % des robots de ce catalogue.

Si le problème de la conception de robots médicaux a déjà été abordé, notre étude est plus ambitieuse dès lors qu'elle va jusqu'à proposer un outil au concepteur, ce qui n'avait pas encore été réalisé. Nous savons cependant qu'il faut améliorer la technique proposée, ne serait-ce qu'en précisant mieux les bornes exploitées dans l'organigramme. La considération de bornes « floues », associées à une logique de même nom, devrait conduire à retenir parmi plusieurs solutions candidates des topologies en bonne correspondance avec les cahiers des charges. Par ailleurs la combinaison de cette technique de choix de solutions avec une phase d'optimisation dimensionnelle devrait apporter un meilleur résultat. Nous envisageons d'appliquer cette démarche globale de conception de robot pour l'application particulière de télé-échographie, où le choix de solution serait mené à l'aide d'une méthode par satisfaction de contraintes, en minimisant une fonction multi-critères objectif. Lorsque que la synthèse dimensionnelle sera validée pour l'application de télé-échographie, elle pourra être appliquée à d'autres robots médicaux. La réalisation successive des étapes de la démarche de synthèse de mécanismes permettra alors d'établir une méthodologie de conception de robots médicaux.

#### Références :

- Al Bassit L. 2005 Structures mécaniques à modules sphériques optimisées pour un robot médical de télé-échographie mobile, thèse de l'Université d'Orléans.
- Chavanon O. 2003 Aide informatisée aux gestes de chirurgie cardiaque, thèse de l'Université Joseph Fourier – Grenoble I.
- Chedmail P., Dombre E., Wenger P. 1998. La CAO en robotique outils et méthodologie. Hermès.
- Duchemin G. 2002 Commande et programmation d'un robot d'assistance au geste médical pour des tâches de suivi au contact de tissus mous, thèse de l'université de Montpellier.
- Maurin B. 2005 Conception et réalisation d'un robot d'insertion d'aiguille pour les procédures percutanées sous imageur scanner, thèse de l'Université de Strasbourg I.
- Michelin M. 2004 Contribution à la commande de robots pour la chirurgie mini-invasive, thèse de l'Université de Montpellier.
- Nouaille L., Smith Guérin N., Poisson G. 2006 Analyse comparative de structures cinématiques en robotique médicale, CNRIUT Brest.
- Pierrot F., Dombre E., Dégoulange E., Urbain L., Caron P., Boudet S., Gariépy J., Mégnien J. 1999 "Hippocrate: A safe robot arm for medical applications with force feedback," *Med. Image Anal.*, vol. 3, pp. 285–300.
- Pierrot F. 2003 A few guidelines for the Design of surgical Robot Arms, Summer School on Surgical Robotics de Montpellier.
- Poignet P., Poisson G. 2005 La conception de robots pour l'assistance aux gestes médicaux et chirurgicaux. JNRR.
- Sallé D. 2004 Conception Optimale d'Instruments Robotisés à haute Mobilité pour la Chirurgie mini-invasive, thèse de l'Université de Paris VI.
- Vilchis A. 2003 Télé-échographie robotisée, thèse de l'Université de Grenoble,.
- Zemiti N. 2005 Commande en effort des systèmes robotiques pour la chirurgie mini-invasive, thèse de l'Université de Paris VI.