



HAL
open science

Développement d'un système robotique pour la cryothérapie de la prostate

Salih Abdelaziz, Laure Esteveny, Pierre Renaud, Bernard Bayle, Michel de
Mathelin

► **To cite this version:**

Salih Abdelaziz, Laure Esteveny, Pierre Renaud, Bernard Bayle, Michel de Mathelin. Développement d'un système robotique pour la cryothérapie de la prostate. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422582

HAL Id: hal-03422582

<https://hal.science/hal-03422582v1>

Submitted on 9 Nov 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.

Développement d'un système robotique pour la cryothérapie de la prostate

S. ABDELAZIZ, L. ESTEVENY, P. RENAUD, B. BAYLE ET M. DE MATHELIN

LSIT, Université de Strasbourg-CNRS-INSA, Strasbourg

Résumé :

La réalisation de gestes percutanés sous IRM est une voie médicale très prometteuse. La complexité des gestes rend cependant nécessaire une assistance robotique. Cette dernière est un réel défi pour le concepteur, du fait de l'étroitesse du tunnel et du champ magnétique intense y régnant. Nous proposons un nouveau système pour la cryothérapie, une procédure percutanée d'ablation, basé sur un robot à câbles afin d'optimiser sa compacité. Une démarche de conception de robots à câbles est proposée et appliquée pour définir le système. Sa conception est ensuite présentée, en décrivant notamment une structure instrumentée originale qui permet de mesurer les tensions des câbles.

Abstract :

Performing medical gestures under MRI is a promising medical approach. However, the complexity of the gestures makes it necessary to introduce a robotic assistance. It is a challenge for the designer, given the confined physical space and the magnetic field in the scanner bore. We propose a novel system for prostate cryotherapy based on a wire-driven robot to optimize its compactness. A design methodology of wire-driven mechanisms is proposed and applied to develop the device. The design is presented with in particular the use of an original instrumented structure that allows the evaluation of the cable tensions.

Mots clefs : Robotique médicale, Conception, Optimisation, Analyse par intervalles

1 Introduction

Dans le champ de la radiologie interventionnelle, des procédures minimalement invasives sont réalisées par insertion d'aiguilles sous le guidage direct d'un imageur. L'IRM est un outil particulièrement intéressant : ni le patient ni le praticien ne sont exposés à des rayons ionisants, et l'IRM permet d'obtenir de forts contrastes dans l'observation de tissus mous. Pour une technique telle que la cryothérapie, qui vise à la destruction de tumeurs cancéreuses par des cycles de congélation et réchauffement, la réalisation de gestes dans l'IRM est actuellement délicate. Lorsque le patient est dans le tunnel du scanner, l'accès est restreint et la tâche de positionnement complexe. Une assistance robotique doit permettre le développement de ces techniques localisées de traitement des cancers. L'espace limité dans le tunnel et le fort champ magnétique utilisé par l'imageur introduisent cependant des contraintes de conception fortes. Dans ce contexte, nous proposons un système original pour la cryothérapie de la prostate, basé sur un robot à câbles pour optimiser sa compacité. Une méthodologie de conception pour les mécanismes à câbles est proposée et appliquée dans notre contexte.

2 Cahier des charges et choix initiaux

La conception du dispositif a été accomplie en collaboration avec le CHU de Strasbourg. La procédure de cryoablation adoptée est basée sur un accès transpérineal à la prostate : le patient, sous anesthésie générale, est installé dans une position lithotomique (Fig. 1(a)). Durant l'intervention, une ou plusieurs aiguilles sont positionnées puis insérées jusqu'à atteindre des cibles visées sur la prostate, en utilisant les images IRM. Selon la taille de la prostate, le point d'entrée de l'aiguille sur la surface du périnée est

compris dans un disque de diamètre 50 mm, illustré par la Figure. 1(b). Pour des raisons anatomiques, l'orientation maximale de l'aiguille est considérée égale à $\pm 30^\circ$ lorsque le point d'entrée de l'aiguille se situe à l'intérieur d'un cercle de diamètre 35 mm. À l'extérieur de ce cercle, l'aiguille est insérée de manière droite.

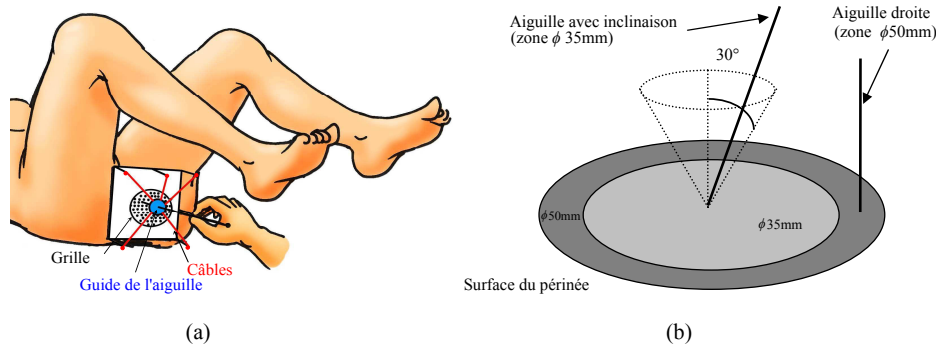


FIGURE 1 – (a) Patient en position lithotomique avec le robot à câbles et la grille de positionnement installés entre ses jambes, (b) Espace de travail du dispositif

Le dispositif robotique proposé est un positionneur d'aiguille qui va permettre de pointer de manière automatique la cible visée. L'insertion de l'aiguille se fait manuellement pour que le praticien bénéficie d'un retour haptique naturel. Afin de réaliser le positionnement du guide, un mécanisme plan associé à une grille de positionnement est considéré. La grille de positionnement est composée d'un ensemble de trous dont la forme permet l'insertion des aiguilles et leur rotation. Le mécanisme plan est basé sur un robot à câbles dont l'effecteur (qui correspond au guide de l'aiguille) est relié à la base via plusieurs câbles. Le déplacement de ce guide dans le plan du mécanisme est obtenu en contrôlant la longueur des câbles. L'axe d'une aiguille est positionné dans l'espace en 3 temps : le mécanisme positionne d'abord le guide devant l'emplacement adéquat sur la grille. Le radiologue insère partiellement l'aiguille dans le trou de la grille de sorte à ce qu'elle affleure la peau du patient. Le mécanisme déplace ensuite le guide d'aiguille pour obtenir l'orientation nécessaire de l'aiguille. Le geste d'insertion peut alors être réalisé.

Durant l'insertion, l'aiguille est en interaction avec les tissus, le radiologue et le guide de l'aiguille. Une liaison plane relie la grille à l'effecteur afin que les efforts perpendiculaires au plan du mécanisme à câbles, qu'il ne peut compenser, soient repris par la grille. Les forces comprises dans le plan du mécanisme ont une direction quelconque et une amplitude de l'ordre de 5 N. Elles peuvent être représentées comme un disque de rayon 5 N dans l'espace des torseurs. Ces efforts sont contrebalancés par les tensions des câbles. Ces tensions sont limitées à 60 N, afin d'éviter de surdimensionner les moteurs et les câbles. Une tension minimale de 10 N est considérée afin d'assurer une pré-tension correcte des câbles et éviter leur fléchissement.

3 Méthodologie de conception

3.1 État de l'art

Les mécanismes à câbles se distinguent de nombreux mécanismes par le fait que les câbles ne peuvent que tirer l'effecteur et pas le pousser. Plusieurs auteurs se sont intéressés à la caractérisation de la capacité de ces mécanismes à générer un torseur donné sur l'effecteur. Dans [4], l'ensemble des torseurs disponibles (ETD) est défini comme étant l'ensemble de tous les torseurs qu'un mécanisme à câbles peut générer pour une configuration donnée de l'effecteur en respectant des tensions limites. L'espace des torseurs générables (ETG) est introduit comme l'ensemble des poses de l'effecteur pour lesquelles tout torseur parmi un ensemble donné peut être généré à l'aide des tensions admissibles dans les câbles. [1] a proposé de déterminer analytiquement les frontières de l'ETG. Dans [2], la géométrie de l'ETD est identifiée comme étant un zonotope. Plusieurs formes de l'ensemble des torseurs de la tâche (ETT)

sont considérées, y compris des points, des hyper-rectangles ou encore des hyper-ellipsoïdes. Pour des formes hyper-rectangulaires, [5] a déterminé l'ETG pour des mécanismes à 6 degrés de liberté (DDL) en utilisant une analyse par intervalles.

Cependant, peu de travaux s'adressent au problème de l'optimisation lors de la conception de ces mécanismes à câbles. Dans [6], l'approche par intervalles est utilisée pour déterminer les géométries possibles d'un mécanisme plan entraîné par 4 câbles, en assurant qu'un espace de travail donné soit complètement inclus dans l'ETG. Cette approche n'est néanmoins pas applicable si la forme de l'ETT est une hyper-ellipsoïde ou un disque, comme c'est le cas de notre application. Une autre approche est considérée dans [3] avec le développement d'un algorithme d'optimisation basé sur un algorithme génétique. Après la discrétisation de l'espace de travail, l'inclusion de l'ETT dans l'ETD est vérifiée. Néanmoins, la discrétisation est très coûteuse en temps de calcul lorsque le nombre de DDL augmente. En conséquence, nous proposons une méthodologie de conception qui se compose de deux étapes. La première étape vise à optimiser l'ETD en vue de minimiser le volume du robot pour une tâche donnée. L'algorithme utilise les propriétés de l'ETD introduites dans [2] afin de déterminer les paramètres de conception optimaux en utilisant un ensemble de configurations de l'effecteur obtenu sans avoir recours à une discrétisation systématique. La deuxième étape consiste à valider les résultats obtenus précédemment en utilisant une approche par intervalles.

3.2 Approche d'optimisation et application

3.2.1 Formulation du problème

Considérons un mécanisme à n DDL entraîné par m câbles. Sa géométrie est définie par la position des points d'attache sur la base et sur la plate-forme, exprimés dans un ensemble de paramètres ξ . Pour une pose donnée \mathbf{X} de la plate-forme, l'ensemble A des torseurs disponibles \mathbf{f} que les câbles peuvent générer sur la plate-forme est défini par :

$$A = \{ \mathbf{f} \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{f} = \mathbf{W}\boldsymbol{\tau}, \tau_i \in [\tau_{i_{min}}, \tau_{i_{max}}], 1 \leq i \leq m \} \quad (1)$$

$\mathbf{W} = \mathbf{W}(\mathbf{X})$ est la matrice des torseurs unitaires de dimension $n \times m$. Le vecteur $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \dots, \tau_m]^T$ est le vecteur des tensions dans les câbles. Les tensions minimale et maximale admissibles pour chaque câble i sont notées, respectivement, $\tau_{i_{min}}$ et $\tau_{i_{max}}$. L'ensemble A est délimité par l'intersection de k hyperplans, qui constituent un zonotope [2] (Fig. 2). Ces hyperplans peuvent être caractérisés analytiquement par la méthode de translation des hyperplans, réalisée en trois étapes. D'abord, le vecteur unitaire \mathbf{c}_i perpendiculaire à l'hyperplan i est déterminé. Ensuite, la position de l'hyperplan H_i est définie au moyen d'un point \mathbf{p}_i appartenant à cet hyperplan. Ces deux étapes sont répétées afin de définir tout les hyperplans possibles. Enfin, les distances d_{io} entre l'origine et les différents hyperplans sont calculées via la relation :

$$d_{io} = \mathbf{c}_i^T \mathbf{p}_i \quad (2)$$

Ces distances dépendent de la position \mathbf{X} de la plate-forme et de l'ensemble des paramètres géométriques ξ : $d_{io} = d_{io}(\mathbf{X}, \xi)$. Un torseur donné \mathbf{f}_0 peut être généré à l'aide des câbles si et seulement si :

$$\mathbf{C}\mathbf{f}_0 \leq \mathbf{D}_o \quad (3)$$

avec $\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_k]^T$ et $\mathbf{D}_o = [d_{1o}, \dots, d_{ko}]^T$.

3.2.2 Optimisation et validation des résultats par intervalles

L'espace de travail requis W et l'ensemble des torseurs de la tâche T sont des données d'entrée pour l'algorithme d'optimisation. Le mécanisme est défini par l'ensemble des paramètres géométriques ξ . La procédure d'optimisation permet de déterminer l'ensemble des paramètres géométriques optimaux en deux étapes. Dans la première étape, pour un jeu de paramètre initial ξ_0 , l'ensemble des positions critiques \mathbf{X}_i de la plate-forme, pour lesquelles les distances d_i , $i \in [1, k]$ sont minimales, est déterminé. d_i représente la distance entre la facette i du zonotope et la bordure de l'ETT. Dans la deuxième

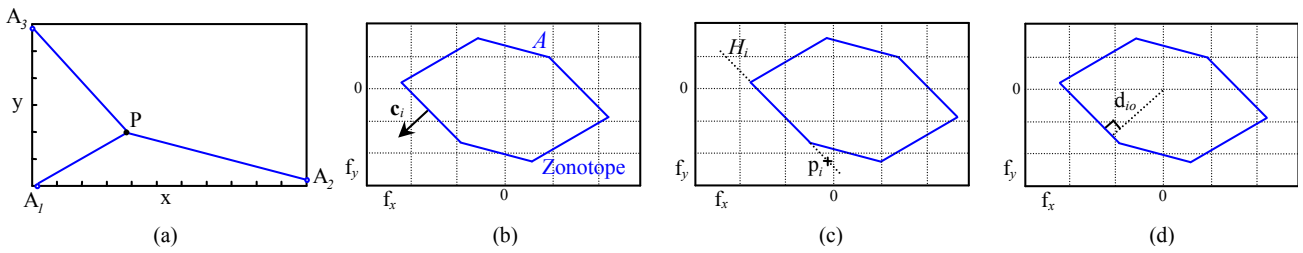


FIGURE 2 – Exemple de caractérisation de l'ensemble des torseurs disponibles par un zonotope, (a) mécanisme plan $n = 2$ et $m = 3$, (b-d) application de la méthode de translation des hyperplans pour caractériser le zonotope

étape, un ensemble de paramètres optimaux ξ_{op} est déterminé en minimisant le volume du robot, sous la contrainte que toutes les distances d_i restent positives. En d'autres termes, on cherche à déterminer ξ_{op} pour lequel nous avons une inclusion intégrale de $T \subseteq A$ aux positions critiques \mathbf{X}_i , $i \in [1, k]$ de la plate-forme. L'algorithme d'optimisation est alors exprimé :

$$\begin{aligned}
 \text{Étape 1 :} \quad & \mathbf{X}_i = \underset{\mathbf{X} \in W}{\operatorname{argmin}} d_i(\mathbf{X}, \xi_0); \quad 1 \leq i \leq k \\
 \text{Étape 2 :} \quad & \begin{cases} \xi_{op} = \underset{\xi}{\operatorname{argmin}} \operatorname{volume}(\xi) \\ \text{Sous contraintes : } d_i(\mathbf{X}_i, \xi) \geq 0; \quad 1 \leq i \leq k \end{cases} \quad (4)
 \end{aligned}$$

L'ensemble des paramètres géométriques optimaux ξ_{op} permet de satisfaire l'inclusion de $T \subseteq A$ uniquement pour certaines configurations critiques de l'effecteur. Afin de vérifier cette inclusion sur l'ensemble de l'espace de travail, une approche par intervalles est utilisée. Connue dans la littérature comme un outil de validation, de caractérisation et d'optimisation pour les robots (ex. [6], [7]), nous proposons de nous servir de cette approche pour valider les conditions associées au zonotope. Notre approche consiste donc à analyser les distances d_i , $i \in [1, k]$ introduites auparavant et à vérifier si ces distances calculées par intervalles sont positives sur l'ensemble de l'espace de travail.

L'algorithme tel qu'il est représenté dans la Figure 3 permet de déterminer si ξ_{op} satisfait les conditions sur l'espace de travail. Les distances d_i dépendent de la pose \mathbf{X} de l'effecteur. L'évaluation par intervalles d'une distance $d_i(\mathbf{X})$ produit un intervalle $d_i^I(\mathbf{X}^I)$ où l'exposant I désigne les variables appartenant à des intervalles. Dans l'étape 3, l'évaluation par intervalles de ces distances pour l'intervalle B_i est calculée. L'ensemble des torseurs de la tâche est considéré inclus dans l'ensemble des torseurs disponibles pour l'intervalle B_i si et seulement si le minimum de la borne inférieure de \mathbf{D}^I est positif (étape 4). Ces distances sont souvent surestimées à cause de l'arithmétique par intervalles et, par conséquence, si le minimum de la borne inférieure de \mathbf{D}^I est négatif, un bi-sectionnement de B_i est effectué. Le processus de bi-sectionnement est arrêté lorsque la largeur de toutes les composantes de B_i est inférieure à un seuil δ .

1. $i = 1, p = 1, T, \xi_{op}, \mathbf{B}_1 = W$
2. **While** $i \leq p$
3. $\mathbf{D}^I = [d_1^I(\mathbf{B}_i, \xi_{op}), \dots, d_k^I(\mathbf{B}_i, \xi_{op})]^T$
4. **if** $(\min(\inf(\mathbf{D}^I)) \geq 0)$ then $\mathcal{L}_i^* = \mathbf{B}_i$, $i = i + 1$, **go to** step 2
5. **else if** the widths of all components of \mathbf{B}_i are lower than a threshold δ then **return** 0
6. **else** Bisect (\mathbf{B}_i) , $p = p + 2$, $i = i + 1$, **go to** step 2

FIGURE 3 – Algorithme de validation par intervalles

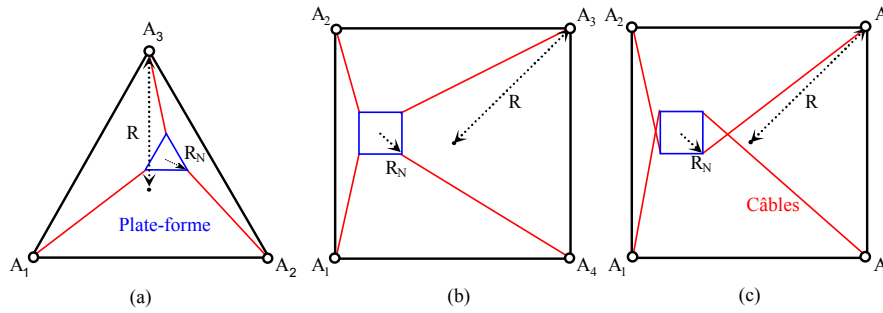


FIGURE 4 – (a) architecture triangulaire symétrique à 3 câbles, (b) architecture carrée à 4 câbles non croisés, (c) architecture carrée à 4 câbles croisés.

4 Application à l'optimisation du système robotique de positionnement d'aiguilles

4.1 Choix d'architecture par optimisation

Trois architectures sont dimensionnées en utilisant la méthode développée précédemment (Fig. 4), afin de sélectionner la plus compacte. Du fait de la symétrie de la tâche, les architectures peuvent être caractérisées par un rayon R_N pour l'effecteur et un rayon R pour la base. Le rayon R_N est contraint par la taille du guide et est considéré égal à 5 mm.

Après optimisation des trois structures, la solution la plus compacte est celle basée sur une structure carrée, avec l'emploi de 4 câbles non croisés. Le rayon d'implantation des câbles est alors égal à 49 mm.

4.2 Conception du dispositif

La CAO du manipulateur est représentée sur la Figure. 5. Ses dimensions finales sont 100mm \times 100mm \times 40mm. La structure et la grille de positionnement des aiguilles sont réalisées en prototypage rapide à base de résines polymères pour assurer la compatibilité avec l'IRM. Les câbles retenus sont en polyéthylène Dyneema®. Afin d'évaluer la position de l'effecteur, les variations de longueur des câbles sont mesurées à l'aide de codeurs optiques intégrés aux coins de la structure, basés sur des roues codeuses en tungstène et 2 paires de fibres optiques montées en barrage pour obtenir des signaux de sortie du codeur en quadrature.

Les actionneurs sont placés à l'extérieur de la salle IRM en vue d'optimiser la compacité et la compatibilité IRM du mécanisme. Des câbles sous gaines sont utilisés pour la transmission. Afin de contrôler finement le dispositif même en présence de frottements et de flexibilité des câbles, une instrumentation de la structure est proposée. Des capteurs d'effort à technologie optique sont intégrés dans la structure pour évaluer les tensions des câbles. Ceci est possible en attachant les câbles sur une structure en treillis. Les câbles passent alors à travers l'effecteur, s'enroulent sur des poulies montées aux coins de la structure (Fig 5) avant d'être enroulés sur les poulies des actionneurs situés en dehors de la salle IRM.

Lorsque les câbles sont tendus, les barres qui composent le treillis sont soumises à des forces de compression. Des dispositifs compliant transforment ces efforts en déplacements de leviers situés sur la face supérieure de la structure. Des capteurs de déplacement à fibre optique permettent alors de mesurer ces déplacements, et finalement les efforts dans les câbles en connaissant la position de l'effecteur. Les dispositifs compliant sont réalisés en cuivre-béryllium afin d'assurer une bonne compatibilité IRM.

Le dispositif a été testé à l'intérieur du scanner (Fig. 5) et présente une très bonne compatibilité avec le scanner. Ni les capteurs ni la structure n'introduisent d'artefacts dans les images IRM.

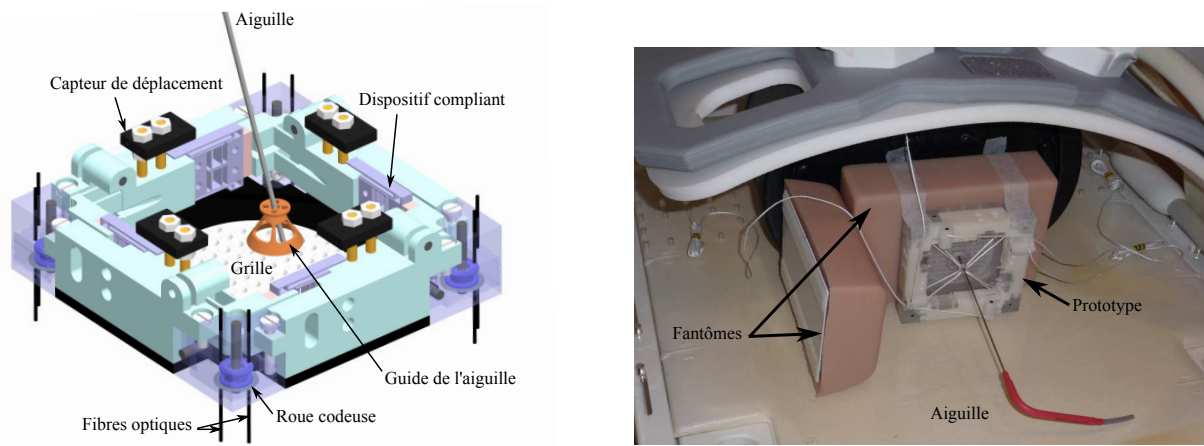


FIGURE 5 – (à gauche) CAO du robot, (à droite) éléments de structure du prototype du robot

5 Conclusions

Dans cet article, un système robotique original basé sur un robot à câbles a été proposé pour la cryothérapie de la prostate. Une méthodologie de conception est développée pour ce type de robot et appliquée dans notre contexte. Trois architectures candidates ont été analysées avant de retenir une structure carrée avec câbles non croisés. La conception du dispositif a été présentée, en montrant notamment l'intégration de capteurs d'effort optiques afin de permettre l'estimation de la tension des câbles. Le développement de lois de commande tirant parti des informations de tension et de position sont maintenant conçues, avant d'envisager des expérimentations in vivo.

Références

- [1] Bosscher, P., Riechel, A., and Ebert-Uphoff, I., 2006, "Wrench-Feasible Workspace Generation for Cable-Driven Robots", *IEEE Transactions on Robotics*, **22**(5), pp. 890-902.
- [2] Bouchard, S., Gosselin, C., and Moore, B., 2008, "On the Ability of A Cable-Driven Robot to Generate A Prescribed Set of Wrenches", in *Proceedings of the ASME IDETC/CIE Mechanics and Robotics Conference*, Las Vegas, USA.
- [3] Bouchard, S., "Géométrie des robots parallèles entraînés par des câbles", 2008, PhD thesis.
- [4] Ebert-Uphoff, I. and Voglewede, P., 2004, "On the connection Between Cable-Driven Robots, Parallel Manipulators and Grasping", in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4521-4526, New Orleans, USA.
- [5] Gouttefarde, M., Daney, D. and Merlet, J-P, 2011, "Interval-Analysis-Based Determination of the Wrench-Feasible Workspace of Parallel Cable-Driven Robots", *IEEE Transaction on Robotics*, **27**(1), pp. 1-13.
- [6] Gouttefarde, M., Krut, S. Company, O., Pierrot, F. and Ramdani, N., 2008, "On the design of Fully Constrained Parallel Cable-Driven Robots", in *Advances in Robot Kinematics*, pp. 71-78, Nantes, France.
- [7] Hao, F., and Merlet, J.-P., 2005, "Multi-criteria Optimal Design of Parallel Manipulators Based on Interval Analysis", *J. Mechanism and Machine Theory*, **40**, pp. 157-171.