HAL
open science

Développement d'un système robotique pour la radiologie interventionnelle sous IRM

Salih Abdelaziz

To cite this version:

Salih Abdelaziz. Développement d'un système robotique pour la radiologie interventionnelle sous IRM. Autre. Université de Strasbourg, 2012. Français. NNT : 2012STRAD034 . tel-00801844

HAL Id: tel-00801844

https://theses.hal.science/tel-00801844

Submitted on 18 Mar 2013

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.

N° d'ordre : ——

École Doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur

Thèse

présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Strasbourg

par

Salih ABDELAZIZ

Développement d'un système robotique pour la radiologie interventionnelle sous IRM

Membres du jury :

Directeur de Thèse	Michel De Mathelin, Professeur, Université de Strasbourg
Rapporteur Externe	Jean-Pierre Merlet, Directeur de Recherche INRIA, Sophia-Antipolis
Rapporteur Externe	Nicolas Andreff, Professeur, FEMTO-ST, Université de Franche-Comté
Examinateur	Marc Gouttefarde, Chargé de Recherche CNRS, LIRMM, Montpellier
Examinateur	Pierre Renaud , Maître de conférences, INSA Strasbourg
Examinateur	Bernard Bayle, Professeur, Université de Strasbourg

Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection LSIIT
UMR UdS-CNRS 7005

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu de m'avoir donné la force et la volonté pour accomplir ce travail de thèse, Dieu merci.

Je souhaite adresser ma gratitude à mon directeur de thèse, Michel De Mathelin, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche, l'équipe Automatique, Vision et Robotique (AVR) du laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection. La confiance que m'avez accordée et les moyens que vous avez mis à ma disposition m'ont permis de mener à bien ce projet de recherche ; je vous en suis très reconnaissant.

Mes plus vifs remerciements vont évidemment à mes encadrants Pierre Renaud et Bernard Bayle, avec qui je prends toujours autant de plaisir à travailler. Vos conseils toujours avisés et votre détermination m'ont permis d'avancer à pas sûrs dans l'accomplissement de ce travail. Merci de m'avoir laissé suffisamment de liberté pour explorer de nouvelles pistes de travail et surtout de m'avoir fait profiter de vos larges connaissances. Très sincèrement, je suis très honoré de travailler avec vous. Merci pour tout.

Je tiens tout particulièrement à exprimer mes remerciements à Jean-Pierre Merlet, directeur de recherche INRIA à Sophia-Antipolis, ainsi qu'à Nicolas Andreff, professeur à l'Université de Franche-Comté pour avoir accepté de rapporter sur ce mémoire et aussi pour avoir pris le temps d'évaluer mon travail consciencieusement. Vos remarques et suggestions très pertinentes ont suscité en moi la curiosité scientifique et l'envie d'aller encore plus loin dans la recherche. De même, je tiens à remercier Marc Gouttefarde, chargé de recherche CNRS à Montpellier d'avoir eu la gentillesse d'examiner ce travail et de participer sans hésitation à ce Jury.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à Laurent Barbé pour m'avoir fait profiter de ses larges compétences techniques et pour le temps qu'il m'a consacré. De même, je remercie Laure Esteveny, avec qui j'ai collaboré pendant une partie de ma thèse. C'était vraiment très agréable de travailler avec toi. Merci à Phillipe Zanne et Lucile Zorn pour leur aide précieuse et à tous les membres de l'équipe AVR. Je rajouterai une petite mention à Ahmed Karim pour les nombreux dessins présents dans ce manuscrit et à M. Michel Grosdidier pour la réalisation des anneaux de la plate-forme du robot.

Je remercie très chaleureusement les anciens et nouveaux doctorants du laboratoire que j'ai côtoyés durant ces années et avec qui j'ai partagé des moments mémorables, Bérengère, Julien, Mathieu, Norbert, Fadi, Houssem, Xavier, Lennart, Antonio, Laure, Markus, Nitish, Ryad, Arnaud, Laure-Anaïs, Nadège, Paolo et Xavier.

Sur une note plus personnelle, je tiens à exprimer mes profonds remerciements à mes parents, qui ont fait de moi l'homme que je suis aujourd'hui. Merci pour toutes les opportunités que vous avez rendues possibles grâce à vos soutiens et vos encouragements.

Je ne remercierai jamais autant ma femme, qui a su m'encourager pour le sprint final et surtout me réconforter pendant les moments de doute. Sans toi, ce travail n'aurait pas pris la même allure. Merci à toi Soumia.

Enfin, je dédie ce mémoire à tous ceux qui me sont chers, mes parents, ma femme, mon frère, ma sœur, mes nièces, mes neveux, mes grands-parents, ma belle-famille, mes beaux-frères, mes belles-sœurs, ma grande famille et tous mes amis depuis l'enfance.

À toi ma chère petite Houda que j'aimerai éternellement.

Table des matières

Introduction **1**

1 Cahier des charges, état de l'art et solution cinématique **5**
1.1 Analyse du geste 5
1.1.1 Anatomie de la prostate 5
1.1.2 Espace de travail 6
1.1.3 Besoins cliniques 7
1.2 Systèmes existants 8
1.2.1 Systèmes de guidage passifs 8
1.2.2 Assistants robotiques semi-automatiques 9
1.2.3 Systèmes d'insertion automatique 10
1.2.4 Systèmes de téléopération avec retour d'effort 12
1.2.5 Synthèse 13
1.3 Solution proposée 14
1.3.1 Principe de l'approche robotique de positionnement : scénario d'insertion 14
1.3.2 Protocole médical associé à l'utilisation du dispositif robotique 16
1.3.3 Le dispositif MRGuide 16
1.4 Conclusion 18

2 Caractérisation et optimisation géométrique des robots à câbles **19**
2.1 Introduction 19
2.2 Caractérisation d'un robot à câbles 20
2.2.1 Définitions 20
2.2.2 Espace atteignable des robots à câbles 21
2.3 Robots à câbles instrumentés 22
2.3.1 Instrumentation et stratégies de mesure 22
2.3.2 Contraintes pour l'estimation de l'espace de travail 25
2.4 Cas d'une mesure de déformation 27
2.4.1 Contraintes additionnelles 27
2.4.2 Choix d'une analyse par intervalles 28
2.4.3 Algorithme proposé 29
2.4.4 Exemples 31
2.4.5 Conclusion 36

2.5 Cas d'une mesure de déplacement 36
2.5.1 Besoin d'une méthode d'optimisation du robot à câbles 37
2.5.2 Formulation du problème 37
2.5.3 Algorithme d'optimisation 38
2.5.4 Application 40
2.6 Conclusion 43

3 Le système de positionnement MRGuide 47
3.1 Technologies et instrumentation du dispositif 47
3.1.1 Choix de la structure en treillis 47
3.1.2 Évaluation de la tension des câbles 49
3.2 Prototype et tests d'évaluation 53
3.2.1 Description du système 53
3.2.2 Câbles et actionnement 54
3.2.3 Tests de compatibilité IRM 55
3.3 Validation de l'instrumentation sur la structure du MRGuide 56
3.4 Conclusion 59

4 Commande et expérimentations 63
4.1 Commande des robots à câbles : état de l'art 63
4.1.1 Stratégies de commande 63
4.1.2 Algorithmes de gestion coordonnée des tensions dans les câbles 64
4.2 Modélisation du MRGuide 65
4.2.1 Modèle géométrique inverse 66
4.2.2 Modèle géométrique direct 66
4.2.3 Modèle cinématique inverse 67
4.3 Principe de l'asservissement du robot MRGuide 68
4.3.1 Algorithme de faisabilité 68
4.3.2 Algorithme de gestion coordonnée 70
4.4 Évaluation expérimentale de la commande 73
4.4.1 Asservissement en position de la plate-forme du MRGuide 73
4.4.2 Asservissement en position avec supervision de tension 78
4.5 Conclusion 80

5 Conclusion 83
5.1 Conclusions 83
5.2 Perspectives 84

A Modèles tenant compte de la géométrie du MRGuide 87

B Modèle dynamique du robot 91

Références 101

Introduction

Radiologie interventionnelle

La radiologie interventionnelle est une technique permettant de réaliser des actes médicaux minimalement invasifs à des fins diagnostiques ou thérapeutiques (biopsie, ablation par exemple). Ces procédures sont accomplies par l'insertion percutanée d'aiguilles sous guidage direct d'un imageur. Cette technique a été développée dans les années 1960, avec une première intervention percutanée transluminale guidée par angiographie [Payne 2001]. Ayant pour but de réduire les traumatismes postopératoires et la durée d'hospitalisation, la radiologie interventionnelle a suscité un vif intérêt dans la communauté médicale. En 2009, 545 000 actes de radiologie interventionnelle ont été réalisés dans l'hexagone dont 315 000 diagnostics et 230 000 actes thérapeutiques [Rad 2012].

Les modalités d'imagerie utilisées sont diverses : imagerie échographique, à rayon X ou imagerie par résonance magnétique (IRM). Étant données les performances limitées des dispositifs échographiques, les scanners sont souvent préférés, pour leur bien meilleure qualité d'image. Néanmoins, ces dispositifs présentent l'inconvénient d'exposer le patient et l'équipe médicale à des doses importantes de rayons X, une exposition qui risque potentiellement de nuire à leur santé. L'IRM ne présente en revanche aucun risque pour le patient ni pour le praticien étant donné son caractère non ionisant. De plus, l'IRM possède d'excellentes performances en termes de contraste et de discrimination des tissus mous.

Cancer de la prostate et thérapies

Le carcinome de la prostate est le cancer le plus fréquent chez l'homme, hormis le cancer de la peau. En 2008, environ 900.000 cas et 258.000 décès ont été recensés dans le monde, particulièrement en Europe et au États-Unis d'Amérique [Glo 2012]. En France, il est la deuxième cause de mortalité par cancer chez l'homme, après le cancer du poumon. Ce cancer représente donc un problème majeur de santé publique car au moins 70 % des hommes de plus de 50 ans sont concernés.

Dans le passé, la prostatectomie, qui consiste en une ablation chirurgicale de la prostate, était la seule option pour traiter ce cancer. Néanmoins, les effets secondaires associés tels que l'incontinence et le dysfonctionnement érectile sont très significatifs [McCullough 2005].

Aujourd'hui, des thérapies alternatives comme la curiethérapie, les ultrasons focalisés ou encore la cryothérapie, sont développées pour réaliser des traitements non chirurgicaux. Les ultrasons focalisés sont des procédures de destruction ciblée de cellules cancéreuses par émission de signaux ultra-sonores. La curiethérapie consiste, quant à elle, à implanter des éléments radioactifs à l'intérieur ou à proximité des cellules cancéreuses pour traiter localement la tumeur. La maîtrise de l'effet ionisant reste délicate pour traiter des tumeurs à proximité des structures anatomiques telles que l'urètre et le rectum. La cryothérapie consiste à détruire des tumeurs par des cycles de congélation et de réchauffement. La zone congelée est facilement repérable dans une image IRM et la morbidité associée à cette technique est très faible en comparaison des autres approches. Cette nouvelle approche peut donc devenir une voie intéressante dans le traitement du cancer.

Cryothérapie de la prostate sous IRM et limitations

La cryothérapie de la prostate sous IRM est actuellement en phase de développement au Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Strasbourg [Gangi 2010]. À ce jour, plus d'une dizaine de cryothérapies de la prostate ont été pratiquées en utilisant une IRM 1,5 T à grand anneau (MAGNETOM Espree, Siemens, Allemagne) et un système de cryoablation compatible IRM (Galil Medical, USA).

Deux procédures sont nécessaires pour le traitement du cancer de la prostate. D'abord, une à plusieurs biopsies sont effectuées. Ensuite, après un diagnostic positif, la procédure de cryothérapie peut avoir lieu pour traiter le patient. Dans les deux cas, une à plusieurs aiguilles sont positionnées puis insérées jusqu'à atteindre les zones visées de la prostate en se basant sur des images IRM. Dans le cas d'une biopsie, les aiguilles sont insérées puis extraites, après le prélèvement d'un échantillon de tissus. Pour la cryothérapie, plusieurs aiguilles peuvent êtres nécessaires pour couvrir le volume de la tumeur. Une fois les aiguilles positionnées, de l'argon est détendu à leurs extrémités. Des températures très basses, de l'ordre de -185°, permettent alors la destruction des tissus tumoraux. Une fois la tumeur traitée, les aiguilles sont réchauffées à des températures supérieures à 33°à l'aide d'hélium pour permettre leur extraction. L'expansion de la zone congelée est contrôlée en temps réel avec les images IRM, comme illustré sur la Figure 1. Deux cycles de congélation/réchauffement sont effectués afin de détruire la tumeur.

La procédure de cryothérapie de la prostate sous IRM est difficile à effectuer manuellement. Elle est longue et requiert beaucoup d'expertise. Cette difficulté est liée d'une part à l'étroitesse du tunnel IRM et d'autre part à la complexité du geste en lui-même. Le radiologue est en effet amené à recaler mentalement les différentes aiguilles par rapport aux images 2D issues de l'IRM. Ceci demande un effort important, toutefois nécessaire pour obtenir un positionnement convenable. Une assistance robotique semble donc très pertinente.

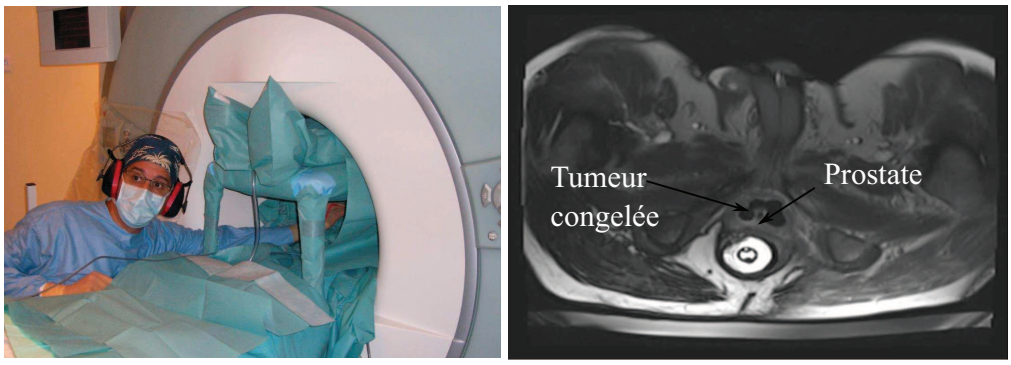

FIGURE 1 – À gauche, procédure de cryoablation avec le patient dans le scanner. À droite, mise en évidence de la congélation de la tumeur avec une image IRM.

Contributions et plan du mémoire

Nous proposons à travers cette thèse de développer un assistant robotique pour le traitement du cancer de la prostate dans l'IRM. La complexité des gestes et les contraintes introduites par l'environnement IRM nécessitent un certain nombre de réflexions sur le choix du mode d'assistance, sur la conception d'une technologie compatible IRM et sur la stratégie de commande adéquate.

Dans le premier chapitre, nous décrivons le cahier des charges en termes de besoin clinique, espace de travail et contraintes imposées par l'environnent IRM. À partir de la bibliographie sur les systèmes existants, nous arrivons au constat que la plupart des systèmes développés pour les interventions prostatiques sont encombrants. Ceci empêche de reprendre rapidement une procédure manuelle dans le cas d'une complication médicale ou d'une défaillance du système. Pour diminuer considérablement la taille du dispositif, nous proposons d'étudier une solution robotique originale basée sur un robot à câbles instrumenté avec un actionnement déporté. D'abord, la cinématique du manipulateur proposé est introduite. Ensuite, le principe de l'approche semi-automatique et le scénario d'insertion d'aiguille sont décrits. Enfin, le protocole médical associé à l'utilisation du dispositif est détaillé.

En vue d'une meilleure intégration du dispositif dans le scanner, nous caractérisons puis optimisons les dimensions de notre solution dans le deuxième chapitre. En plus des contraintes qui limitent l'espace de travail des robots à câbles conventionnels, l'emploi d'une structure instrumentée introduit de nouvelles contraintes structurelles et limite ainsi l'espace atteignable. Nous proposons donc de déterminer l'espace associé à ces contraintes en utilisant une approche par intervalles. Cette approche permet de vérifier la faisabilité d'une structure à câbles instrumentée. Par ailleurs, nous avons développé un algorithme d'optimisation géométrique permettant de déterminer les paramètres de conception optimaux. Cet algorithme se compose de deux étapes séquentielles. La première étape consiste à minimiser le volume du robot pour une tâche donnée. La deuxième étape permet la vérification des résultats obtenus lors de la première étape en se basant sur une approche par intervalles.

Le choix d'un actionnement déporté nécessite l'évaluation de la tension des câbles. Pour cela, nous utilisons une structure déformable, un mécanisme amplificateur et une technologie de mesure optique détaillées dans le troisième chapitre. L'implémentation de cette technique de mesure et la validation expérimentale sont réalisées sur un banc de test dédié. Les choix de conception, y compris les matériaux, les câbles et les actionneurs sont étudiés. Le prototype et son évaluation en termes de compatibilité avec le scanner sont exposés.

Enfin le dernier chapitre de ce mémoire est consacré au développement d'une stratégie de commande adaptée au dispositif proposé. Un état de l'art sur les stratégies de commande développées pour les robots à câbles est exposé. À travers l'évaluation expérimentale d'une de ces stratégies sur notre dispositif, nous montrons l'intérêt de disposer d'une mesure locale de tension des câbles dans le cas d'un actionnement déporté. Suite à ce résultat, nous proposons une nouvelle stratégie de commande basée sur l'intégration d'une boucle interne de tension afin de contrôler correctement le dispositif.

1 Cahier des charges, état de l'art et solution cinématique

Dans ce premier chapitre, nous analysons les gestes réalisés par le praticien, à savoir la biopsie et la cryothérapie, afin de définir le niveau d'assistance requis pour le dispositif robotique. À partir de cette analyse et après une étude bibliographique, nous proposons une solution originale pour la biopsie et la cryothérapie de la prostate sous IRM.

1.1 Analyse du geste

1.1.1 Anatomie de la prostate

La prostate est une glande de l'appareil génital masculin. Elle a pour fonction de sécréter le liquide séminal qui favorise l'avancement des spermatozoïdes dans l'ovule. En forme de noix (cf. Figure 1.1), sa taille moyenne est de $50 \times 35 \times 40$ mm^3. Entourée d'une capsule fibro-élastique, la prostate est située en dessous de la vessie et devant le rectum. Elle est traversée par l'urètre qui constitue le canal de sortie de la vessie.

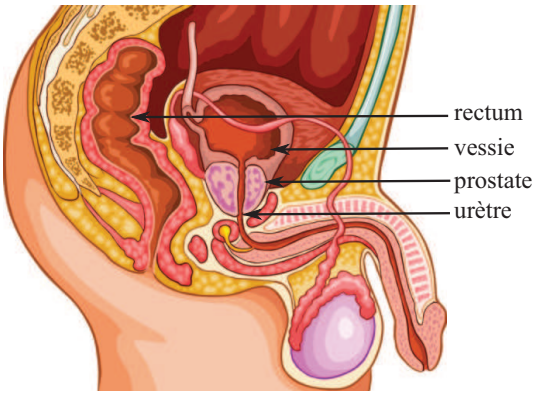

FIGURE 1.1 – Position de la prostate.

1.1.2 Espace de travail

L'espace de travail, i.e l'ensemble des positions et orientations que peut prendre l'aiguille, a été analysé en considérant le geste tel que pratiqué par le Pr. A. Gangi au CHU de Strasbourg. Le patient, sous anesthésie générale, est installé dans une position lithotomique (cf. Figure 1.3, à gauche). L'accès à la prostate se fait à travers le périnée. Une à plusieurs aiguilles sont positionnées puis insérées jusqu'à atteindre les zones visées de la prostate. Dans le cas d'une cryothérapie, les aiguilles utilisées sont creuses et ont un diamètre de 1,47 mm (cf. Figure 1.2, à droite). Elles sont facilement repérables dans les images IRM du fait de leur matériau. Le radiologue utilise souvent une grille de positionnement (cf. Figure 1.2, à gauche) compatible IRM comme élément de repérage afin de situer le point d'insertion sur le périnée. Plaquée contre la surface du périnée, la grille tend à réduire les mouvements internes de la prostate et améliore l'accès au périnée.

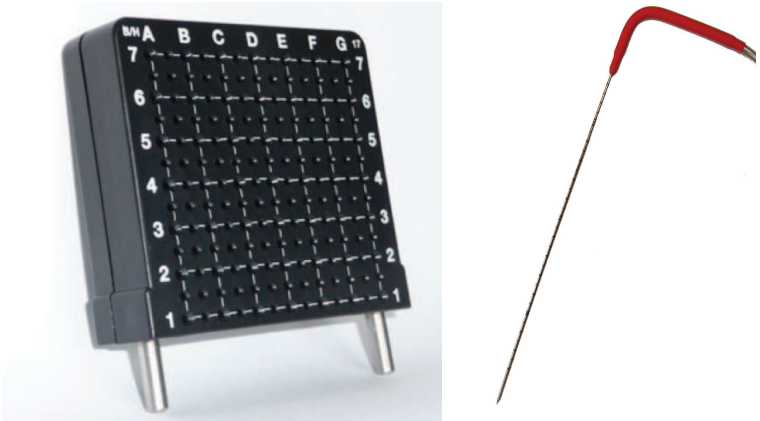

FIGURE 1.2 – À gauche, grille de positionnement compatible IRM. À droite, aiguille de cryothérapie.

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 (cf. Figure 1.3, à droite). La prostate étant située à 70 mm de la surface du périnée, la présence des structures anatomiques alentours (urètre, rectum et le sphincter) oblige à insérer les aiguilles avec angulation pour atteindre les cibles désirées. L'orientation maximale de l'aiguille est considérée égale à ±30°lorsque le point d'entrée de l'aiguille se situe à d'intérieur d'un cercle de diamètre 35 mm. À l'extérieur de ce cercle, l'aiguille est insérée perpendiculairement à la peau. La tâche de positionnement de l'aiguille nécessite cinq degrés de liberté (ddl), trois pour la position, et deux pour l'orientation. La rotation propre n'est pas nécessaire. La grille actuellement utilisée n'est pas adaptée pour effectuer les orientations désirées car son épaisseur est de 20 mm. Si l'utilisation d'une grille est retenue, il est essentiel qu'elle permette l'insertion des aiguilles avec des orientations différentes.

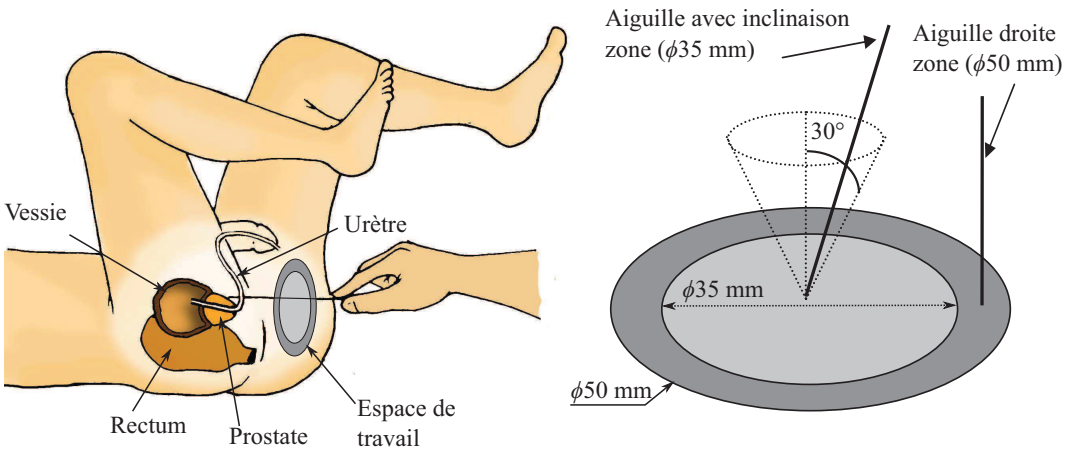

FIGURE 1.3 – À gauche, approche trans-périnéale de la prostate. À droite, espace de travail de l'aiguille.

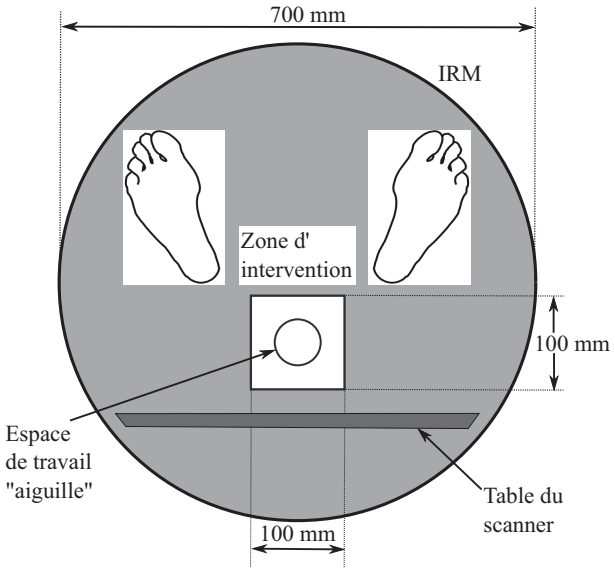

FIGURE 1.4 – Mise en évidence de l'espace réservé au dispositif à l'intérieur du scanner.

1.1.3 Besoins cliniques

Nous avons défini une liste des besoins cliniques que nous devons prendre en considération lors de la conception de l'assistant robotique. Naturellement, la sécurité du patient est le point central. Lors d'une procédure robotisée, si une complication survient, il est impératif de pouvoir reprendre une procédure manuelle en peu de temps. Par conséquent, l'assistant doit être de conception compacte et légère pour pouvoir le dégager rapidement de la zone d'intervention, illustrée à la Figure 1.4. Les dimensions du scanner sur cette figure sont celles du MAGNETOM Espree, 1.5 T de Siemens. Un deuxième élément fondamental est l'hygiène

clinique : chaque élément du dispositif situé dans la zone d'intervention en contact direct avec le patient doit être stérilisé avant utilisation et le rester pendant l'acte. La compatibilité du mécanisme avec le scanner est le troisième élément indispensable. Les composants du mécanisme ne doivent pas interférer avec le scanner et son champ magnétique. Les artefacts ne nuisent pas à la sécurité du patient, mais lorsqu'il s'agit de la manipulation d'instruments (e.g. insertion d'aiguille), la dégradation des images devient problématique en termes de sécurité. Dès lors, le dispositif doit préserver la qualité des images. La précision du dispositif est le quatrième élément requis pour améliorer le geste. Durant l'intervention et pendant l'acquisition des images, le dispositif doit demeurer dans la région imagée, en contact avec le patient. Ceci est essentiel pour vérifier la position et l'orientation des aiguilles en temps-réel. Enfin, la facilité et la rapidité de manipulation du dispositif est nécessaire pour réduire la durée de l'intervention.

1.2 Systèmes existants

Pas moins d'une vingtaine de dispositifs robotiques compatibles IRM [Tsekos 2007] ont été développés ces quinze dernière années dans différents contextes. Masamune et al. proposent un système robotique dans le contexte de la neurochirurgie [Masamune 1995] et Larson et al. introduisent un dispositif pour réaliser des biopsies mammaires [Larson 2003]. Parmi toutes les solutions existantes, une seule a été commercialisée par l'entreprise Innomedic®. Il s'agit d'un système de positionnement et de guidage d'aiguilles [Melzer 2008] pour des interventions abdominales et dorsales. Baptisé INNOMOTION, cette solution n'est actuellement plus distribuée. En ce qui concerne les interventions prostatiques, une dizaine de dispositifs compatibles IRM existent aujourd'hui. Ils ont surtout été développés dans l'optique de réaliser une biopsie ou une injection d'éléments radioactifs dans le cadre d'une curiethérapie. Nous allons analyser ces dispositifs par rapport aux critères de la section précédente, à savoir la capacité de basculer rapidement vers une procédure manuelle, la durée de l'intervention, la compacité et la compatibilité avec le scanner. Ces dispositifs sont classifiés par la suite suivant le type d'assistance : passifs, semi- automatique, automatique, ou téléopérés.

1.2.1 Systèmes de guidage passifs

Les systèmes de guidage passifs sont des systèmes non actionnés qui aident le praticien à réaliser son geste. Krieger et al. [Krieger 2005] proposent un dispositif robotique (cf. Figure 1.5, à gauche) instrumenté pour un accès trans-rectal à la prostate. Le dispositif est un robot passif permettant la translation et l'orientation d'un guide d'aiguille. Ce guide est monté sur un bras manipulateur passif. Ce dernier est fixé sur une glissière linéaire montée sur la table du scanner. Trois micro-bobines sont attachées rigidement à ce guide d'aiguille afin d'établir sa position. Chaque micro-bobine est composée d'un fil enroulé sur un tube rempli d'une solution en Gadolinium visible dans les images IRM. Un prototype a été réalisé afin d'évaluer les performances du dispositif. Des résultats d'expériences in vivo et des essais cliniques sur

FIGURE 1.5 – À gauche, système de positionnement passif développé par [Krieger 2005]. À droite, Dynatrim, solution passive de positionnement développé par Invivo Corp.

40 patients ont été rapportés [Krieger 2010].

Une autre solution est proposée par Invivo Corp (cf. Figure 1.5, à droite) permettant la réalisation des biopsies prostatiques par accès trans-rectal. Le patient est couché sur le ventre avec ses jambes écartées. Le praticien vient positionner manuellement un guide d'aiguille qui est tenu ensuite par le robot afin d'effectuer l'insertion. Le recalage de l'axe de l'aiguille par rapport au scanner est réalisé de façon manuelle.

1.2.2 Assistants robotiques semi-automatiques

En mode semi-automatique, le positionnement de l'axe de l'aiguille est réalisé de façon automatique, l'insertion étant manuelle. L'équipe de Chinzei [Chinzei 2001] a proposé un dispositif d'usage général (cf. Figure 1.6, à gauche). Il s'agit d'un robot parallèle à cinq ddl dont le bâti est fixé au dessus de la tête du praticien. Les auteurs utilisent des moteurs piézoélectriques linéaires. Deux bras longs et rigides descendent vers le champ opératoire portant l'effecteur. Ce dernier permet de positionner et orienter un pointeur laser ou un cathéter par lequel une aiguille est insérée manuellement. De par son architecture, le robot peut être adapté pour réaliser des interventions de curiethérapie avec un accès trans-périnéal. Néanmoins, son usage est possible uniquement dans une IRM à double anneau, qui n'est plus utilisée aujourd'hui. Cette architecture de l'IRM offre un accès facile au patient mais présente néanmoins une résolution beaucoup plus faible que les IRMs à tunnel fermé. Des tests ont été menés sur des mannequins afin de valider les performances du système. À ce jour, aucun essai clinique n'a été rapporté.

Dans une même approche, Plante et al. [Plante 2009] proposent un assistant robotique dont la tâche est de réaliser des biopsies ou des procédures de curiethérapie trans-périnéale dans une IRM fermée (cf. Figure 1.6, à droite). Le patient est dans une position lithotomique avec le dispositif installé entre ses jambes. Le dispositif est basé sur deux manipulateurs placés dans deux plans parallèles verticaux. Chaque manipulateur est doté de six actionneurs élastomères diélectriques uniformément répartis sur un cercle. Les centres de ces deux cercles définissent

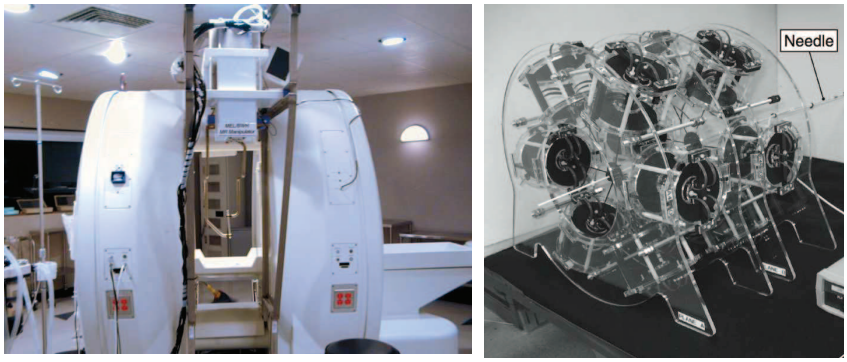

FIGURE 1.6 – À gauche, assistant robotique monté sur une IRM à double anneau. À droite, dispositif de positionnement d'aiguilles dont l'insertion est réalisée manuellement.

l'axe de l'aiguille. En changeant la position de ces deux points, l'orientation de l'axe de l'aiguille est imposée. Une fois l'axe positionné, le radiologue peut donc insérer l'aiguille. La position et l'orientation de l'aiguille sont mesurées à l'aide d'un capteur de position électromagnétique collé à l'extrémité de l'aiguille.

Récemment, Krieger et al. [Krieger 2010] ont développé une nouvelle version de leur dispositif avec cette fois-ci une approche semi-automatique. La cinématique est similaire à celle décrite auparavant dans [Krieger 2005]. Cependant, dans cette nouvelle version, la translation et l'orientation de l'effecteur sont actionnées par des moteurs piézoélectriques. Ces actionneurs sont placés à 20 cm de la zone imagée de la prostate afin de réduire les artefacts. Le recalage du robot dans le scanner est réalisé à l'aide d'une méthode hybride détaillée dans [Krieger 2006]. De manière simplifiée, elle consiste à utiliser des marqueurs passifs avec des codeurs compatibles IRM afin de suivre la position du guide en temps-réel. Le principal avantage de la méthode réside dans la facilité d'implémentation dans différents scanners. La précision revendiquée est meilleure que les autres techniques existantes.

1.2.3 Systèmes d'insertion automatique

Étant donné que le tunnel des scanners IRM conventionnels fermés est profond (150-200 cm), l'insertion automatique d'aiguilles ou la télé-opération avec retour d'effort sont souvent considérées. Goldenberg et al. [Goldenberg 2008] se sont intéressés au développement d'un système robotique pour des interventions de curiethérapie trans-périnéale pour lesquelles le patient est allongé en position dorsale avec le robot installé entre les jambes. Le robot (cf. Figure 1.7(a)) possède six ddl dont la cinématique est découplée par conception : rotations et translations sont séparées. Les auteurs ont utilisé des actionneurs piézoélectriques. Le prototype est fabriqué en aluminium et a été testé dans l'IRM avec un outil d'ablation. Placé dans le champ de vue du scanner, le robot introduit de petit artefacts dans l'image.

Avec une approche similaire, Muntener et al. [Muntener 2008] proposent un robot complètement automatisé, baptisé MrBot (cf. Figure 1.7(b)). Il est actionné par des moteurs pneuma-

tiques (PneuStep) spécialement conçus pour être compatibles IRM [Stoianovici 2007]. L'accès à la prostate se fait à travers le périnée. Le patient est allongé dans une position décubitus latérale avec ses jambes repliées afin de faciliter l'intégration du robot dans le scanner. L'effecteur du robot a été conçu pour loger des aiguilles de curiethérapie. Par ailleurs, des applications diverses telles que l'ablation ou la biopsie peuvent être réalisées aisément car l'effecteur est facilement détachable et interchangeable. Un marqueur attaché à l'effecteur est utilisé pour recaler le robot dans l'image. Ce marqueur est composé d'un tube en ligne droite puis en forme ellipsoïde rempli d'une solution visible dans l'image. Le prototype est fabriqué en matériau non magnétique (plastique, céramique et caoutchouc), afin de garantir une bonne compatibilité avec le scanner. La présence du robot dans différents scanners (0.5 T, 1.5 T, 3 T et 7 T) n'a causé aucune interférence. Des tests ont été menés sur sujets canins afin de valider la preuve de concept.

Fisher et al. [Fischer 2008] ont présenté un dispositif (cf. Figure 1.7(c)) permettant de positionner l'axe d'une aiguille de manière automatique, avec deux modes d'insertion possibles, manuel ou automatique. Le patient est dans une position semi-lithotomique avec le robot installé entre ses jambes. Le robot, à huit ddl, est situé au-dessus d'une glissière linéaire fixée sur la table du scanner. Le positionnement de l'aiguille et son insertion sont réalisés par les six premiers ddl. Quant aux deux derniers, ils servent à rétracter la canule et pivoter l'aiguille atour d'elle-même. La position de l'axe de l'aiguille dans l'image est établie en deux étapes. D'abord, le robot est recalé dans l'image à l'aide d'un marqueur passif attaché à sa base. Ensuite, la position de l'effecteur par rapport à la base du robot est déterminée par des codeurs optiques conventionnels. Ces capteurs du commerce ne sont actuellement pas transparents et créent des artefacts d'un rayon de 2 à 5 cm autour d'eux. Par conséquent, ils sont placés loin de la zone imagée. Des expérimentations sur mannequin avec insertion manuelle d'aiguille ont été rapportées. A ce jour, uniquement deux ddls sont actionnés [Song 2010].

L'assistant robotique (cf. Figure 1.7(d)) proposé par Elhawary et al. [Elhawary 2010] a pour objectif de réaliser des biopsies dans la prostate. Le patient est allongé dans une position décubitus latérale. L'accès à la prostate se fait à travers le rectum en utilisant une sonde endorectale. Le mécanisme, à cinq ddl, est composé de deux sous-systèmes : un mécanisme de positionnement à trois ddl et un mécanisme d'insertion à deux ddl. La sonde est connectée au mécanisme de positionnement à l'aide d'un cardan passif. Ce dernier permet la rotation de la sonde suivant deux axes. Une fois la sonde correctement positionnée, le mécanisme d'insertion est actionné. Deux micro-bobines attachées à la sonde sont utilisées comme marqueurs passifs pour connaitre la position de la sonde et donc de l'aiguille. Un capteur de force piezorésistif est monté sur l'axe de l'aiguille. Ce capteur fournit un retour sous forme visuelle des efforts appliqués sur l'aiguille, information qui aide le praticien à reconnaitre les zones traversées.

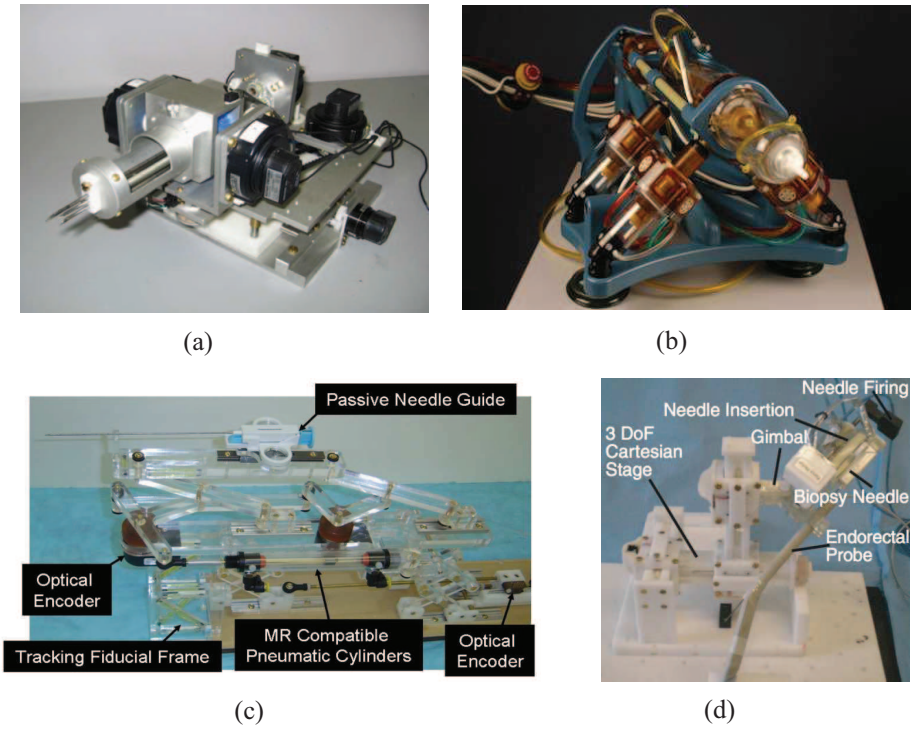

FIGURE 1.7 – (a) MRI-P développé par [Goldenberg 2008], (b) MrBot développé par [Muntener 2008], (c) robot de curiethérapie développé par [Fischer 2008], (d) robot pour la biopsie développé par [Elhawary 2010].

1.2.4 Systèmes de téléopération avec retour d'effort

Le principe d'une téléopération est de contrôler à distance un robot esclave à l'aide d'une console maître. Développé récemment, le dispositif (cf. Figure 1.8, à gauche) proposé par [Song 2010] vise à améliorer la solution introduite dans [Fischer 2008]. L'accès à la prostate se fait à travers le périnée dans une position semi-lithotomique. Pour une meilleur exploitation de l'espace en dessous des jambes, une forme pyramidale du robot est considérée. Avec cette forme, le robot est facilement intégré entre les jambes du patient. Le robot, à quatre ddl, permet le guidage des aiguilles de biopsie et de curiethérapie. Dans sa version actuelle, l'insertion d'aiguilles se fait manuellement. Cependant, l'intégration d'un module d'insertion piloté à distance est prévue [Su 2009] (module avec retour haptique encore en cours de développement). Le dispositif de recalage est le même que celui utilisé dans [Fischer 2008]. Le manipulateur est précis avec une erreur moyenne sur la position de l'effecteur inférieur à 0.11 mm.

Très récemment, Su et al. [Su 2011] ont présenté un dispositif instrumenté (cf. Figure 1.8, à droite) permettant de placer des aiguilles pour la curiethérapie. Il s'agit d'un robot esclave placé à l'intérieur du scanner entre les jambes du patient, installé dans une position semi lithotomique. Le robot permet de réaliser à la fois le positionnement d'un guide d'aiguille et la tâche d'insertion sous contrôle direct d'un radiologue. Lors de l'insertion d'aiguille, le

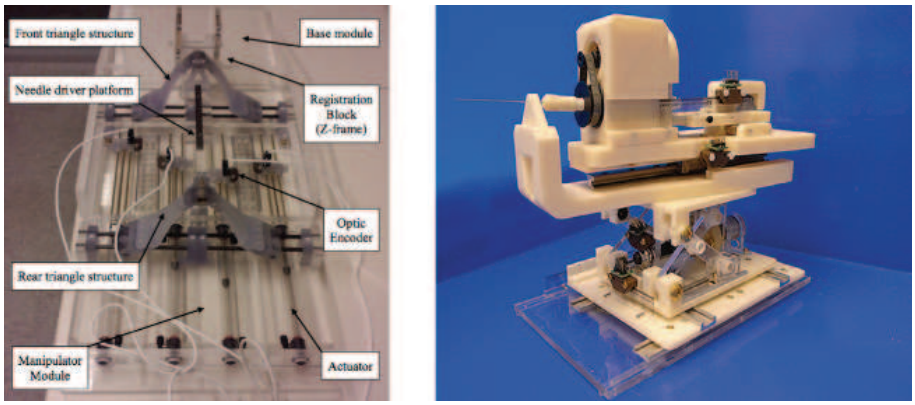

FIGURE 1.8 – À gauche, assistant robotique développé par [Song 2010]. À droite, système automatisé à retour d'effort développé par [Su 2011].

radiologue dispose de la mesure de position de l'aiguille ainsi que d'un retour haptique des efforts d'interaction entre l'aiguille et les tissus traversés. La position de l'aiguille est définie au moyen de codeurs optiques et d'un marqueur passif attaché à la structure. Les efforts mesurés sur l'aiguille sont renvoyés sous forme visuelle au praticien à l'aide d'un capteur de force à technologie optique, intégré au module d'insertion. L'évaluation des performances du mécanisme en termes de compatibilité lors de l'insertion et du pilotage d'aiguille a été effectuée sur mannequin. L'actionnement du mécanisme à l'intérieur du scanner introduit une faible déperdition dans les images, évaluée à moins de 2% du rapport signal sur bruit.

1.2.5 Synthèse

Les systèmes passifs permettent d'aider le praticien à accomplir son geste de façon confortable tout en conservant un retour haptique naturel. Cependant, la durée de l'intervention ne sera pas forcément améliorée car le praticien doit quand même recaler manuellement le dispositif par rapport au scanner. Les systèmes entièrement automatisés ou les systèmes à retour d'effort présentent généralement une cinématique relativement complexe. De plus, l'utilisation des technologies d'actionnement compatibles IRM mène souvent à des dispositifs encombrants, ce qui limite l'accès au patient par le praticien. Ceci peut être problématique pour basculer si besoin vers une procédure manuelle en peu de temps. Enfin, les dispositifs à insertion semi-automatique offrent aux praticiens un retour haptique naturel mais sont relativement encombrants par rapport à la zone d'intervention illustrée dans la Figure 1.4.

Il est important de souligner que la plupart des système développés jusqu'à aujourd'hui ont été conçus pour aller dans une IRM à tunnel profond (150-200 cm). La plupart de ces systèmes considèrent donc une insertion entièrement automatisée ou téléopérée avec retour d'effort. La nouvelle génération d'IRM dite à grand anneau possède en revanche un tunnel plus large (70 cm) et plus court (120 cm). Avec un tel scanner, l'approche manuelle peut être alors considérée [Gangi 2010]. C'est dans ce contexte que nous proposons un système original

pour la biopsie et cryothérapie de la prostate sous IRM.

1.3 Solution proposée

Afin de remplir le cahier des charges, nous proposons un positionneur d'aiguille qui va permettre de pointer de manière automatique la cible visée. L'insertion de l'aiguille se fera manuellement pour que le praticien bénéficie d'un retour haptique naturel. De cette façon, les procédures de biopsie et de cryothérapie pourraient être effectuées sans avoir besoin de sortir le patient du scanner.

1.3.1 Principe de l'approche robotique de positionnement : scénario d'insertion

La position lithotomique du patient n'est pas modifiée. L'accès au périnée est optimisé en utilisant une paire d'étriers (cf. Figure 1.9, à gauche) conçus par L. Esteveny [Esteveny 2010], dans le cadre de son travail de Master. Ces étriers modulables peuvent s'adapter facilement à la morphologie du patient. L'assistant robotique (cf. Figure 1.9, à droite), placé devant le périnée et entre les jambes du patient, est composé d'un mécanisme de pré-positionnement, d'une grille et d'un manipulateur à câbles. Le mécanisme de positionnement relie le manipulateur à câbles à la table du scanner via trois glissières linéaires. Ces dernières servent à réaliser des déplacements dans trois directions. Les mouvements dans le plan transversal permettent d'adapter le dispositif à la morphologie du patient, i.e. à la position du périnée. Le troisième mouvement vise à appliquer une pression sur le périnée dans l'optique de réduire les mouvements internes de la prostate et favoriser l'accès au périnée.

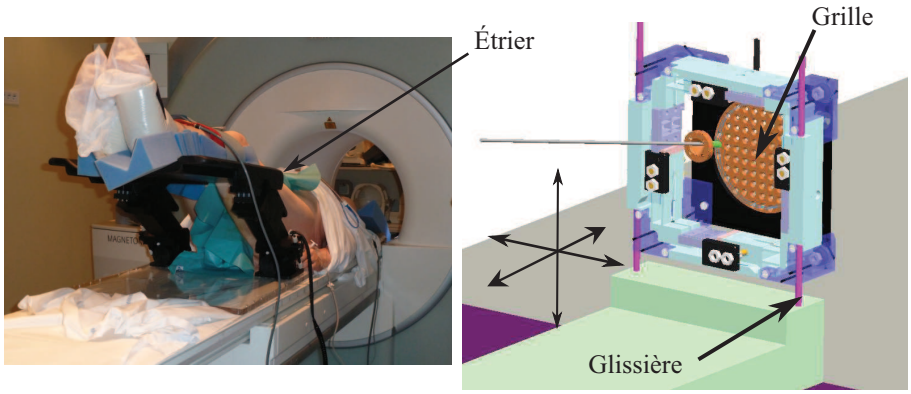

FIGURE 1.9 – À gauche, mise en évidence de l'utilisation des étriers. À droite, vue CAO de l'installation de l'assistant robotique.

La procédure proposée est décrite par les imagettes 1 à 4 de la Figure 1.10. Le mécanisme à câbles associé à la grille pour le positionnement d'aiguille est plaqué contre le périnée du patient. L'axe d'une aiguille est positionné dans l'espace en 4 temps :

– Phase 1 : le mécanisme positionne d'abord le guide devant l'emplacement adéquat sur la grille ;
– Phase 2 : le radiologue insère partiellement l'aiguille dans le trou de la grille de sorte à ce qu'elle affleure la peau du patient ;
– Phase 3 : le mécanisme déplace ensuite le guide d'aiguille pour obtenir l'orientation nécessaire de l'aiguille ;
– Phase 4 : le radiologue insère l'aiguille jusqu'à atteindre la cible visible dans l'image.

Le radiologue doit uniquement déterminer la cible dans l'image, et le dispositif positionnera l'axe de l'aiguille de manière automatique. L'insertion de l'aiguille est la seule tâche manuelle à effectuer.

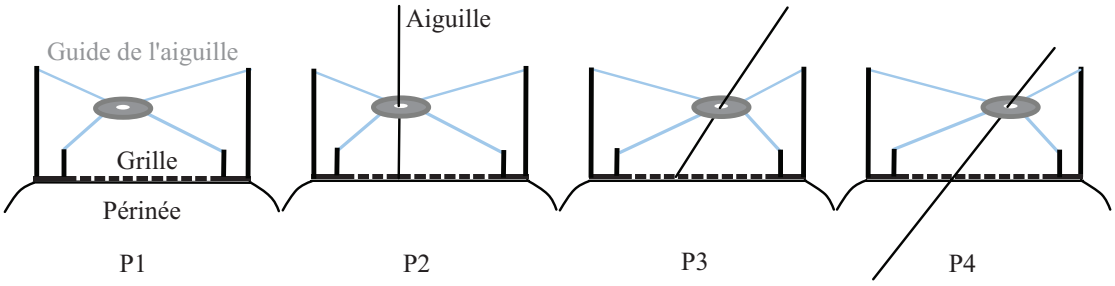

FIGURE 1.10 – Principe de positionnement de l'aiguille avec l'assistant robotique.

Le scénario d'insertion présenté ici considère uniquement une seule aiguille. Cette procédure est bien adaptée pour réaliser une biopsie. En ce qui concerne l'insertion de plusieurs aiguilles dans le cadre d'une cryothérapie, deux stratégies peuvent êtres envisagées. La première consiste à planifier le placement des aiguilles. Dans la phase préopératoire, le radiologue détermine la position et l'orientation des aiguilles. Ainsi, l'ordre de placement est établi de façon à ne pas interférer avec l'environnement alentour, à savoir les câbles, l'effecteur et les aiguilles déjà placées. La deuxième stratégie consiste à positionner non pas directement des aiguilles mais plutôt des tubes porte-aiguilles. Le scénario d'insertion est similaire à celui présenté pour une seul aiguille. D'abord, le tube est placé dans l'effecteur puis positionné et orienté par le mécanisme à câbles. Ensuite, le praticien insère légèrement ce tube de façon à le placer dans un plan inférieur au plan du mécanisme. Une fois tous les tubes positionnés, le mécanisme est retiré pour pouvoir insérer les aiguilles. Ces deux solutions nous paraissent envisageables, sans toutefois avoir eu le temps de les explorer davantage dans le cadre de ce travail. Nous considérons dans la suite le cas d'une seule aiguille, qui représente déjà un besoin dans le cas de la biopsie. L'utilisation de l'assistant robotique est développée dans la sous section suivante avec l'introduction du protocole médical associé à son utilisation.

1.3.2 Protocole médical associé à l'utilisation du dispositif robotique

Le protocole médical associé à l'utilisation de l'assistant robotique, décrit dans [Abdelaziz 2011], est illustré dans la Figure 1.11. Le protocole comprend les étapes usuelles de la procédure manuelle (étapes (a)-(d) et (l)). Les nouvelles étapes (e)-(k) peuvent être décomposées en deux sous-ensembles. Le premier sous-ensemble (e)-(h) est composé de phases obligatoires qui permettent d'adapter le dispositif suivant la morphologie du patient, et de réaliser le recalage par rapport au scanner. Le deuxième sous-ensemble (i)-(k) correspond à la phase d'insertion décrite dans le paragraphe précédent.

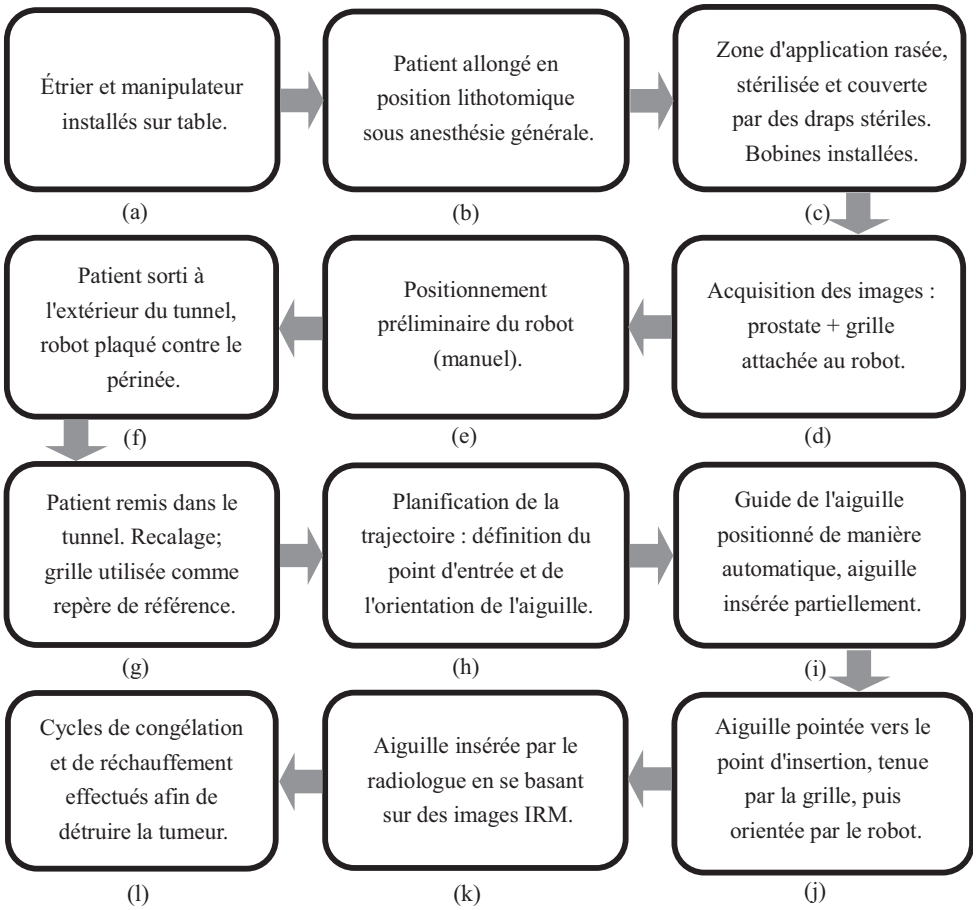

FIGURE 1.11 – Procédure de cryothérapie avec l'utilisation de l'assistant robotique pour le positionnement de l'aiguille.

1.3.3 Le dispositif MRGuide

Le positionnement du guide de l'aiguille est réalisé à l'aide d'un mécanisme plan associé à la grille de positionnement, comme le montre la Figure 1.12. Cette grille de positionnement est similaire à celle utilisée actuellement pour la cryothérapie, mais avec une épaisseur moindre

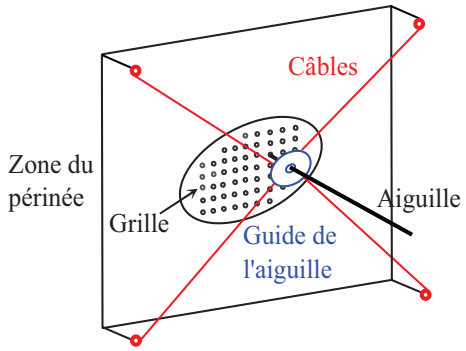

FIGURE 1.12 – Structure du manipulateur proposé.

pour permettre l'orientation des aiguilles. Elle sert par ailleurs à contrecarrer les efforts perpendiculaires au plan du mécanisme à câbles, qu'il ne peut compenser, lors de l'insertion de l'aiguille. Le mécanisme plan est un robot à câbles dont l'effecteur correspond au guide de l'aiguille. Le déplacement de ce guide dans le plan du mécanisme est obtenu en modifiant la longueur des câbles. Sa rigidité est assurée en contrôlant la tension dans les câbles.

Pour faciliter l'intégration du dispositif dans le scanner, nous proposons de placer les actionneurs à l'extérieur de la salle IRM. Avec cette disposition des moteurs, la compacité du mécanisme est améliorée en comparaison avec des technologies compatibles IRM telles que les actionneurs pneumatiques [Melzer 2008, Stoianovici 2007] ou piézoélectriques [Krieger 2010]. De plus, la compatibilité avec le scanner est assurée. Des gaines sont utilisées pour acheminer les câbles jusqu'au manipulateur. Bien entendu, des frottements dans ces gaines vont survenir. En outre, l'allongement des câbles est inévitable. Par conséquent, la tension des câbles et leur déplacement devront être contrôlés aussi près du manipulateur que possible. Dans notre système, la mesure de ces tensions est effectuée de façon originale en utilisant des capteurs à technologie optique intégrés à la structure. Cette intégration vise à réduire la taille du mécanisme. Par ailleurs, même en présence d'un champ magnétique très intense, ces capteurs à technologie optique présentent une très bonne compatibilité avec le scanner, comme par exemple les capteurs proposés dans [Fis 2012].

L'utilisation d'un actionnement déporté et des capteurs optiques nous épargne en partie la problématique de stérilisation. Les capteurs optiques sont en fait faciles à nettoyer. Si pour des raisons médicales, le radiologue veut basculer d'un procédure automatique vers une procédure manuelle, cela pourra être fait de manière très efficace et rapide. On peut facilement couper les câbles et retirer le mécanisme dans son intégralité en laissant uniquement l'effecteur et l'aiguille.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les gestes actuellement pratiquées par le radiologue avec qui nous collaborons, et ses limitations. La complexité de ces gestes montrent la nécessité d'introduire un assistant robotique. La réalisation d'un tel système n'est en revanche pas une tâche facile étant donnés l'encombrement et les contraintes liées à l'environnement IRM. Pour y parvenir, nous avons établi un cahier des charges où on décrit les éléments indispensables à la sécurité et à l'hygiène du patient et au bon fonctionnement du dispositif dans le scanner. Nous avons par ailleurs analysé les systèmes existants compatibles IRM qui ont été développés pour les interventions prostatiques. Ces systèmes n'ayant pas les caractéristiques souhaitées pour remplir le cahier des charges, nous avons donc proposé un assistant robotique original pour les interventions prostatiques dans l'IRM. Il s'agit d'un système à câbles instrumenté permettant de positionner l'axe d'une aiguille de manière automatique sans avoir besoin de retirer le patient à l'extérieur du scanner. L'insertion de l'aiguille, quand à elle, est faite de façon manuelle par le praticien afin qu'il bénéficie d'un retour haptique naturel. Le principe de l'approche semi-automatique et le protocole médical associé à son utilisation ont finalement été décrits.

Afin de faciliter l'intégration du dispositif dans le scanner, sa taille doit être optimisée. Cette problématique est analysée dans le chapitre suivant. Par ailleurs, comme l'actionnement est déporté pour des soucis de compacité et de compatibilité, une instrumentation locale doit être considérée. À travers cette instrumentation, nous souhaitons pouvoir mesurer les tensions des câbles directement dans la structure afin de contrôler le comportement le dispositif. Les stratégies d'instrumentation et la commande du dispositif seront étudiées dans les troisième et quatrième chapitres.

2 Caractérisation et optimisation géométrique des robots à câbles

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, un robot à câbles a été choisi pour réaliser la tâche de positionnement dans le cadre des interventions prostatiques dans l'IRM. Ce robot est intéressant car son actionnement peut être déporté et sa compacité peut ainsi être améliorée. L'utilisation des câbles au lieu des segments rigides permet d'augmenter de manière significative l'espace de travail dès lors que des câbles longs peuvent être utilisés.

Les robots à câbles présentent plusieurs caractéristiques intéressantes, à savoir la rapidité, la facilité de montage et de démontage, la modularité et le rapport charge utile sur poids. Dans la littérature, on trouve plusieurs prototypes exhibant ces caractéristiques. Le robot Falcon proposé par [Kawamura 2000] est un robot à 6 ddl, manipulé par 7 câbles (cf. Figure 2.1). Il présente l'avantage d'être très rapide avec une accélération supérieure à 40 g (g : accélération gravitationnelle). Un autre exemple de prototype a été développé par [Albus 1992]. Il s'agit d'une grue robotisée entraînée par câbles. La grue est suspendue et le maintien des câbles en tension est assuré par la gravité. L'espace de travail de ce robot est finalement plus large que si des segments rigides étaient employés. La modularité est illustrée par la famille des manipulateurs à câbles présentée dans [Merlet 2010]. Cette famille, appelée MARIONET, est composée de 4 manipulateurs différents, tous manipulés entre 6 et 7 câbles.

Dans ce chapitre, nous cherchons à exploiter l'avantage associé à l'utilisation d'un robot à câbles en terme d'espace de travail afin de dimensionner un mécanisme compact capable de remplir la tâche de positionnement. Ce dimensionnement revient à choisir une géométrie adéquate avec le nombre de câbles nécessaire pour l'application. Par ailleurs, comme l'actionnement est déporté, une instrumentation locale semble indispensable pour contrôler le comportement du dispositif de manière fine. L'impact de cette instrumentation sur la caractérisation de l'espace de travail et sur le dimensionnement du robot est discuté.

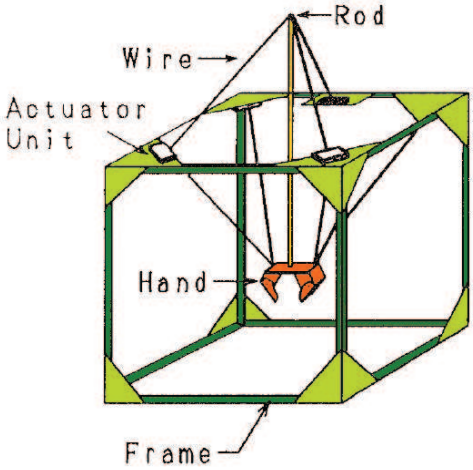

FIGURE 2.1 – Robot Falcon à 6 ddl manipulé par 7 câbles développé par [Kawamura 2000].

2.2 Caractérisation d'un robot à câbles

2.2.1 Définitions

Un manipulateur à câbles est un robot de type parallèle dont les jambes sont des câbles. Il est constitué d'une base, d'une plate-forme rigide et des câbles les liant. La longueur des câbles est pilotée par des actionneurs qui permettent de déplacer et orienter la plate-forme. Les tensions dans les câbles imposent le torseur d'actions mécaniques désiré à la plate-forme. Étant donné qu'on ne peut que tirer sur les câbles, leur tension doit être positive.

L'architecture d'un robot à câbles est définie par sa géométrie, le nombre de câbles et la position des points d'attache respectivement sur l'effecteur et sur la base. Le nombre de câbles et les positions d'attache permettent d'estimer le nombre de ddl. Selon les contraintes de mobilité, le nombre de câbles et le nombre de ddl, ces robots peuvent être classifiés en deux catégories [Ming 1994] :

- **pleinement contraint** : le robot est dit pleinement contraint s'il est capable de générer des efforts dans toutes les directions. Pour qu'un robot à n ddl soit dans cette catégorie, il est nécessaire d'avoir au moins $n+1$ câbles pour que les efforts dans les n directions soient contrôlables [Kawamura 1993]. Cette condition est nécessaire mais pas suffisante.
- **sous-contraint** : le robot est sous-contraint s'il est capable de générer des efforts uniquement dans certaines directions. C'est le cas des robots suspendus où la gravité assure le maintien des câbles en tension. Ainsi, un effort dans un sens opposé à la gravité ne peut pas être compensé par ce type de robot.

Parmi ces deux catégories, les robots pleinement contraints sont les mieux adaptés à notre application car on veut être capable de maîtriser les mouvements de la plate-forme ainsi

que les efforts qui lui sont appliqués en contrôlant uniquement la longueur et la tension des câbles.

2.2.2 Espace atteignable des robots à câbles

Le dimensionnement d'un mécanisme à câbles consiste à assurer l'adéquation de son espace de travail par rapport à la tâche souhaitée. L'espace de travail se définit comme l'ensemble des poses de l'effecteur pour lesquelles 3 contraintes, décrites ci après, sont respectées [Merlet 2004]. Chaque contrainte définit un espace qui lui est propre et l'intersection de ces espaces définit l'espace atteignable.

La première contrainte est liée à la longueur admissible des câbles. Cette dernière limite l'espace atteignable au même titre que le débattement des articulations pour les robots parallèles classiques. Pour déterminer l'espace associé à cette contrainte concernant les mécanismes à câbles, deux approches, initialement développées pour les plate-formes de Gough-Stewart, peuvent être employées. La première approche, proposée par Gosselin [Gosselin 1990], est géométrique et permet de calculer cet espace dans le cas où l'orientation de l'effecteur est fixée. L'autre approche est plus générale et a été développée par Merlet [Merlet 1999]. Elle permet de déterminer cet espace en utilisant les outils de l'algèbre des intervalles. L'orientation de l'effecteur n'est alors pas fixe.

La deuxième contrainte porte sur les interférences, d'une part entre les câbles et d'autre part entre les câbles et la plate-forme. La collision entre câbles et plate-forme a été analysée dans [Merlet 2004, Bouchard 2008b]. Dans les deux approches, la plate-forme est considérée comme un polyèdre avec des facettes planes où l'intersection de ces dernières avec les câbles est analysée. Le cas d'interférence entre les câbles a été aussi analysé dans [Merlet 2004, Bouchard 2008b]. L'approche proposée par [Merlet 2004] permet de déterminer si deux segments de droite, qui modélisent les câbles, s'intersectent, en considérant une orientation constante de l'effecteur. L'autre approche, proposée par [Bouchard 2008b], permet de vérifier en plus si entre deux poses de l'espace de travail, il n'y pas interférence. Dans le contexte des robots parallèles à segments rigides, deux méthodes, présentées dans [Chablat 1998, Merlet 2006], ont été proposées pour déterminer l'espace libre d'interférence entre les jambes. Ces deux approches peuvent être appliquées pour les mécanismes à câbles.

La dernière contrainte est liée à l'équilibre statique de la plate-forme. Étant donné qu'on ne peut que tirer sur les câbles et pas les pousser, les efforts extérieurs appliqués sur la plate-forme devront être contrecarrés par les câbles en y développant des tensions positives. Plusieurs auteurs se sont intéressés à la caractérisation de la capacité des mécanismes à câbles à équilibrer un ensemble de torseurs (parfois un seul torseur) appliqué à son effecteur. Roberts et *al.* dans [Roberts 1998] étudient l'équilibre statique de l'effecteur en considérant des tensions strictement positives. Cette étude consiste à analyser le noyau de la matrice jacobienne, qui relie le torseur d'action mécanique appliqué à son effecteur aux tensions des câbles, pour une pose donnée de l'effecteur afin de déterminer s'il existe

une solution faisable en tension permettant d'équilibrer la force de gravité. Selon que la tension des câbles est bornée ou non, deux types d'espaces de travail sont définis dans [Ebert-Uphoff 2004] : l'espace des poses polyvalentes (EPP) et l'espace des torseurs générables (ETG). L'EPP, appelé "*Wrench Closure Workspace*" ou "*Controllable Workspace*", est défini comme étant *l'ensemble des poses de l'effecteur pour lesquelles n'importe quel torseur peut être généré à l'aide de tensions positives non bornées*. Le calcul de l'EPP est proposé dans [Verhoeven 2004, Stump 2006, Pham 2006, Gouttefarde 2006, Diao 2007] en vérifiant la boucle de fermeture en force à chaque pose de l'espace de travail. Ce calcul dépend uniquement de la géométrie du robot [Gouttefarde 2006], à savoir le nombre de câbles et la position des points d'attache de ces câbles sur la base et sur l'effecteur. L'ETG, appelé "*Wrench feasible workspace*", est défini comme étant *l'ensemble des poses de l'effecteur auquel tout torseur parmi un ensemble donné peut être généré à l'aide des tensions admissibles dans les câbles*. À la différence de l'EPP, le calcul de l'ETG nécessite la définition d'un ensemble particulier de torseurs, appelé ensemble des torseurs de la tâche (ETT). Pour des formes hyper-rectangulaires de l'ETT, Gouttefarde et al. dans [Gouttefarde 2011] proposent de déterminer l'ETG pour des mécanismes à six ddl en utilisant une analyse par intervalles. Bosscher et al. dans [Bosscher 2006] proposent de déterminer analytiquement les frontières de l'ETG pour des mécanismes plans et spatiaux en considérant des tensions bornées avec un minimum à zéro. Ils utilisent les propriétés géométriques de l'ensemble des torseurs disponibles (ETD). Ce dernier se définit comme étant *l'ensemble de tous les torseurs qu'un mécanisme à câbles peut générer en une pose donnée de l'effecteur*. Plus tard, Bouchard et al. dans [Bouchard 2008a] identifient la géométrie de l'ETD comme étant un zonotope et étendent cette approche en considérant même des tensions minimales non nulles. Plusieurs formes de l'ETT sont considérées, y compris des points, des hyperplans ou encore des hyper-ellipsoïdes.

2.3 Robots à câbles instrumentés

2.3.1 Instrumentation et stratégies de mesure

Nous souhaitons mettre en place une stratégie de mesure locale de la tension des câbles. Pour y parvenir, nous proposons d'exploiter les éléments de base qui constituent un robot à câbles à savoir le bâti et les points d'attache des câbles sur la base en y ajoutant une structure déformable en treillis instrumentée. Une structure en treillis est un assemblage de plusieurs barres, connectées entre elles par des liaisons sphériques que l'on appelle des nœuds (cf. Figure 2.2). Chaque nœud assure que les barres soient soumises uniquement à la traction ou à la compression. L'idée est de concevoir un élément de structure qui soit soumis à des forces directement liées à la tension des câbles. Cela est possible en modifiant le chemin conventionnel des câbles comme le montre la Figure 2.2. Chaque câble est attaché au nœud de la structure en treillis, passe à travers la plate-forme en faisant un aller-retour, puis s'enroule sur une poulie montée au coin de la structure avant d'aller vers l'actionneur. Les nœuds de la structure sont liés au bâti de sorte que la structure soit sensible aux tensions dans les câbles.

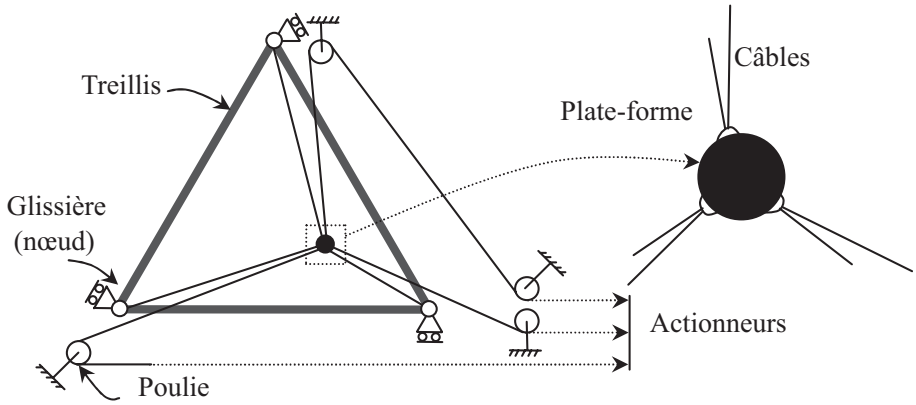

FIGURE 2.2 – Robot à câbles avec une structure en treillis.

Pour évaluer ces tensions, deux stratégies de mesure peuvent être envisagées. La première consiste à mesurer une déformation. Pour y parvenir, on peut soit utiliser des capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg, soit utiliser des jauges de déformation. Un réseau de Bragg est un réflecteur dont la structure alterne deux couches de matériaux d'indice de réfraction différents. Pour un signal lumineux dans le cœur de la fibre (cf. Figure 2.3), le réseau de Bragg permet de réfléchir une gamme spectrale très fine avec une longueur d'onde caractéristique, et laisse passer les autres bandes. Si la fibre est sujette à une contrainte, la longueur d'onde caractéristique sera modifiée, et grâce à cette variation on pourra calculer la contrainte correspondante. Cette stratégie de mesure a été utilisée pour mesurer les efforts ressentis sur une poignée de saisie [Park 2007]. Dans le cas d'un robot à câbles, la solution consiste à coller des fibres optiques munis de réseaux de Bragg sur les câbles ou sur les barres afin de mesurer leurs déformations. Comme les câbles sont en déplacement et que l'on travaille sur de petites dimensions, la faisabilité mécanique d'une telle solution nous semble critique. La deuxième solution consiste à utiliser des jauges de déformation optiques pour mesurer une déformation dans les barres. Des solutions commerciales compatibles IRM existent [Fis 2012, Ops 2012] mais elles restent onéreuses (environ 2500 euros l'unité).

La deuxième stratégie de mesure consiste à mesurer un déplacement. Cette solution est basée sur l'utilisation d'un dispositif placé entre deux fibres optiques, l'une émettrice et l'autre réceptrice. Le dispositif est utilisé soit pour masquer la lumière soit pour la réfléchir [Hirose 1990]. Un mouvement infime du dispositif est perçu par ces fibres optiques et est déterminé uniquement par la variation de l'intensité lumineuse sur les deux fibres. Cette stratégie de mesure a été utilisée dans [Gassert 2008] pour mesurer les efforts dans une interface haptique compatible IRM, illustrée sur la Figure 2.4.

Quelle que soit la stratégie utilisée pour instrumenter la structure, l'amplitude de mesure doit être observable. De plus, la section des barres doit être choisie de sorte à imposer le niveau de déformation requis pour la mesure tout en évitant le flambage de la structure. Ces contraintes doivent être vérifiées pendant la phase d'instrumentation. Les contraintes

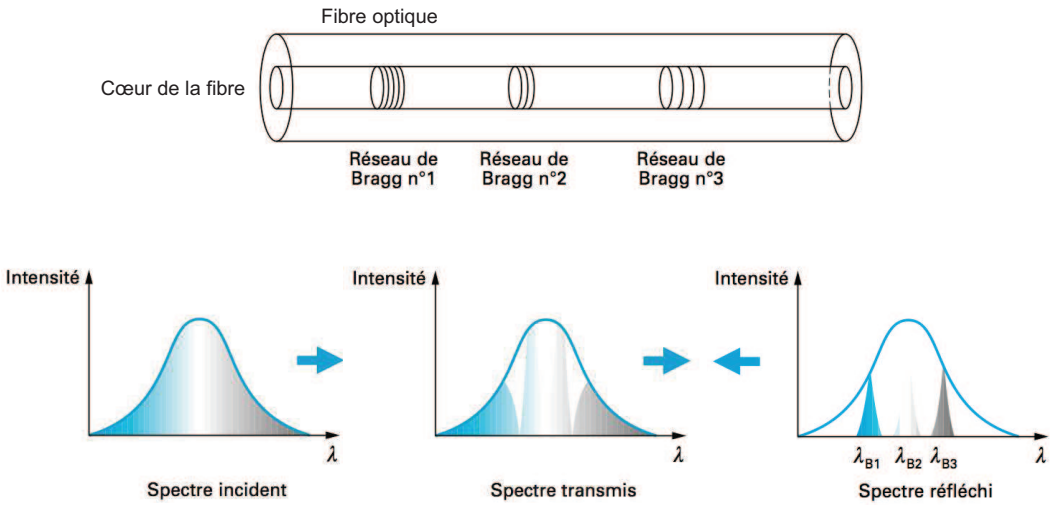

FIGURE 2.3 – Principe des fibres optiques à réseaux de Bragg [Ferdinand 1999].

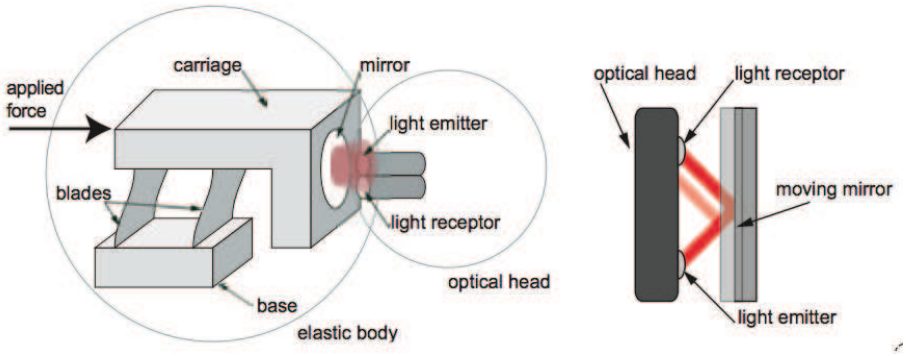

FIGURE 2.4 – Capteur d'effort d'une interface haptique compatible IRM [Gassert 2008].

liées à l'utilisation du robot à câbles doivent également être considérées. La question qui se pose pour un robot à câbles instrumentés est de savoir comment dimensionner un tel robot : est-ce qu'il est possible de regarder les contraintes associées au robot à câbles dans un premier temps, puis déterminer l'instrumentation de la structure en conséquence, ou devons-nous regarder l'ensemble des contraintes en même temps ? Pour répondre, nous proposons de caractériser l'espace de travail d'un robot à câbles instrumenté et analyser l'impact de l'instrumentation sur le dimensionnement d'un tel robot en passant par une description des différentes contraintes.

2.3.2 Contraintes pour l'estimation de l'espace de travail

De la même manière que pour les robots à câbles classiques, le dimensionnement d'un robot à câbles instrumenté consiste à vérifier l'adéquation de son espace de travail par rapport à la tâche désirée. L'analyse de cet espace est légèrement différente de celle des robots à câbles classiques dans le sens où de nouvelles contraintes doivent être prises en compte. Les 3 contraintes considérées usuellement pour définir l'espace de travail des robots à câbles sont également à prendre en compte pour un robot à câbles instrumenté. S'y ajoutent des contraintes structurelles associées à l'utilisation d'une structure en treillis. Dans notre contexte, l'espace atteignable sera donc formé par l'intersection de tous les espaces engendrés par les 3 contraintes plus les contraintes structurelles décrites ci-après.

Contraintes d'interférence et de longueurs admissibles

La contrainte portant sur les interférences câble-câble et câble-effecteur doit être considérée pendant la caractérisation de l'espace de travail d'un robot à câbles instrumenté. Une nouvelle contrainte associée à l'utilisation d'une structure en treillis doit être également prise en compte. Cette contrainte porte sur les interférences, mais cette fois-ci entre les barres du treillis et les câbles d'une part et entre les barres et la plate-forme de l'autre. À ces contraintes s'ajoute celle associée à la longueur permise des câbles.

Contrainte des torseurs admissibles

D'après [Ming 1994, Kawamura 1993], pour un mécanisme parallèle à n ddl entraîné par m câbles, le vecteur $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1 \dots \tau_m)^T$ des tensions dans les câbles est lié au torseur d'action mécanique $\mathbf{f}$ appliqué à son effecteur à l'aide des câbles par la matrice $\mathbf{W}$ des torseurs unitaires :

$$\mathbf{W}\boldsymbol{\tau} = \mathbf{f} \tag{2.1}$$

Cette matrice $\mathbf{W}$, de dimension $(n \times m)$, dépend de la pose (position et orientation) $\mathbf{x}$ de l'effecteur et de la position des points d'attache des câbles sur l'effecteur et sur la base. La matrice $\mathbf{W}$ est composée de m vecteurs colonnes. Pour chaque câble i, le vecteur colonne

correspondant est calculé par :

$$\mathbf{w}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{p}_i \times \mathbf{u}_i \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

où $\mathbf{u}_i$ est un vecteur unitaire porté par le câble i, allant de l'effecteur vers l'actionneur et $\mathbf{p}_i$ est un vecteur allant du centre de gravité de l'effecteur vers le point d'attache du câble i (cf. Figure 2.5). Les trois premières lignes représentent la translation de l'effecteur tandis que les trois dernières représentent la rotation. La matrice $\mathbf{W}$ est égale à la transposée de la matrice Jacobienne, qui relie les vitesses articulaires aux vitesses cartésiennes du robot. Une solution $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}_+^m$ du système d'équation linéaire (2.1) est dite admissible si et seulement si :

$$\boldsymbol{\tau} \in [\boldsymbol{\tau}_{min}, \boldsymbol{\tau}_{max}] \tag{2.3}$$

avec $\boldsymbol{\tau}_{min}$ et $\boldsymbol{\tau}_{max}$ deux vecteurs de dimension $(m \times 1)$ ayant respectivement comme composantes les tensions minimales et maximales dans chaque câble. À une pose donnée de l'effecteur, un torseur $\mathbf{f}$ est dit admissible si et seulement si, il existe une solution $\boldsymbol{\tau}$ au système d'équations linéaires exprimé dans (2.1).

Contraintes structurelles

Pour n'importe quel matériau, il existe un domaine de déformation élastique où le matériau revient à son état initial une fois les sollicitations extérieures supprimées. Ce domaine de déformation réversible est généralement caractérisé par deux seuils limites σ_c et σ_t qui représentent respectivement les limites en compression et en traction. Dans le cas présent, pour chaque barre composant la structure en treillis, ces contraintes doivent être vérifiées :

$$\sigma_c < \sigma_i < \sigma_t, \; i \in [1, b] \tag{2.4}$$

avec σ_i la contrainte dans une barre i parmi un ensemble de b barres qui forment le treillis.

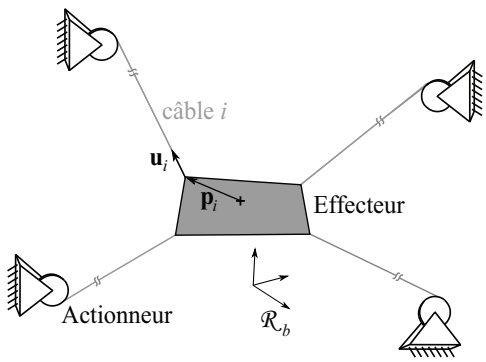

FIGURE 2.5 – Cinématique du robot à câbles.

Étant donné que la structure en treillis est un assemblage de plusieurs barres, il est possible d'estimer son comportement en calculant sa matrice de rigidité globale. Cette approche permet d'établir une relation entre un vecteur $\mathbf{u}$ dont les composantes sont les déplacements des nœuds de la structure en treillis et un vecteur $\mathbf{f}_e$ de chargement extérieur :

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}_s^{-1}\mathbf{f}_e \tag{2.5}$$

où $\mathbf{K}_s$ représente la matrice de rigidité globale de la structure en treillis. Cette matrice peut être évaluée en utilisant les propriétés des barres et la géométrie du treillis. À partir des déplacements des nœuds, on peut calculer le déplacement relatif pour chaque barre. Ainsi, la déformation d'une barre i, notée ϵ_i, est déterminée en faisant le rapport entre le déplacement relatif de ses extrémités et sa longueur. La contrainte σ_i de la barre i peut donc être établie en utilisant la loi de Hooke :

$$\sigma_i = E\epsilon_i \tag{2.6}$$

où E correspond au module de Young du matériau utilisé.

2.4 Cas d'une mesure de déformation

2.4.1 Contraintes additionnelles

Ici le cas d'une mesure de déformation est considéré. Nous souhaitons pouvoir mesurer directement dans la structure, en partant d'une structure en treillis dont la section des barres est considérée constante. Une condition nécessaire pour y parvenir est d'avoir un niveau de déformation adapté au capteur utilisé. Si ce niveau n'est pas satisfaisant, la section des barres peut être diminuée pour rendre observable la mesure. Cependant, la modification de la section risque de faire flamber la structure. Dès lors, il est indispensable de prendre en considération de nouvelles contraintes pendant l'analyse de l'espace de travail.

Le flambage qui correspond à une instabilité dans la structure doit être évité. Cette contrainte doit être vérifiée pour chaque barre :

$$\sigma_i > \sigma_f,\ i \in [1, b] \tag{2.7}$$

La contrainte de flambage σ_f peut être exprimée par la formule d'Euler : $\sigma_f = -\pi^2 EIS/L^2$, où I est le moment quadratique de la barre, S sa surface de section et L sa longueur. Le signe moins vient du fait que l'effort de compression est choisi négatif par convention.

L'autre contrainte correspond à l'étendue de mesure du capteur de déformation que l'on note ϵ_0. Sa valeur dépend des spécifications du fabricant. Cette condition peut être exprimée sous forme de contrainte :

$$-\sigma_0 \leq \sigma_i \leq \sigma_0,\ i \in [1, b] \tag{2.8}$$

avec $\sigma_0 = E\epsilon_0$. Ces deux conditions s'ajoutent à la contrainte déjà définie dans (2.4).

L'ensemble des contraintes est maintenant défini. On souhaite vérifier s'il est nécessaire de considérer les contraintes simultanément pour caractériser l'espace de travail. Pour cela, nous proposons une démarche d'analyse simultanée, qui va nous permettre d'examiner leur dépendance ainsi que leur impact sur la caractérisation de l'espace de travail. Deux exemples seront alors exposés afin d'illustrer la démarche. Le choix d'une méthode adaptée est discuté ci-après.

2.4.2 Choix d'une analyse par intervalles

Parmi l'ensemble des contraintes définissant l'espace de travail du robot à câbles instrumenté, la contrainte des torseurs admissibles nous intéresse particulièrement car elle est liée aux contraintes structurelles. Comme les câbles sont attachés à la structure treillis, les tensions appliquées sur ceux-ci ont un impact direct sur la déformation des barres et donc sur les contraintes structurelles de manière globale. Le lien entre ces deux types de contrainte est exposé ci-après tout en examinant les méthodes proposées pour analyser la contrainte des torseurs admissibles.

Le calcul de l'espace de travail des robots à câbles conventionnels, en considérant la contrainte des torseurs admissibles, à été proposé dans la littérature par deux approches mathématiques différentes : le calcul par discrétisation [Bouchard 2008b, Bosscher 2006] et l'analyse par intervalles [Gouttefarde 2007]. Le résultat obtenu par cette dernière approche est garanti dans le sens où il permet une certification par blocs des poses valides, ce que ne permet pas une méthode par discrétisation. Ici, la caractérisation de l'espace de travail du robot à câbles instrumenté est proposée en utilisant l'approche par intervalles.

Étant donné que les efforts appliqués sur l'effecteur et les tensions dans les câbles sont bornés, il s'agit de déterminer l'ETG. Pour une géométrie donnée du robot, l'ETG est calculé en considérant des tensions admissibles dans les câbles. Dans [Gouttefarde 2007], l'ETG est déterminé en considérant les tensions des câbles dans des intervalles. L'analyse structurelle associée à l'utilisation de la structure instrumentée considère aussi des contraintes dans des intervalles. On peut donc exploiter cette ressemblance pour montrer qu'il est possible d'utiliser l'approche par intervalles en vue de vérifier la faisabilité de la structure.

L'approche proposée dans [Gouttefarde 2007] consiste à résoudre le système d'équations linéaires, exprimé dans l'équation (2.1), à l'aide des outils d'analyse par intervalles. Les composantes de $\boldsymbol{\tau}$, $\mathbf{f}$ et $\mathbf{x}$ appartiennent toutes à des intervalles, que l'on note par la suite par l'exposant I. Le système d'équations linéaires à paramètres intervalles $\mathbf{W}^I\boldsymbol{\tau} = \mathbf{f}^I$ possède alors une solution dans $\boldsymbol{\tau}^I$ si et seulement si la condition suivante est vérifiée :

$$\forall \mathbf{W} \in \mathbf{W}^I, \forall \mathbf{f} \in \mathbf{f}^I, \exists \boldsymbol{\tau} \in \boldsymbol{\tau}^I \text{ tel que } : \mathbf{W}\boldsymbol{\tau} = \mathbf{f} \tag{2.9}$$

avec $\boldsymbol{\tau}^I = [\boldsymbol{\tau}_{min}, \boldsymbol{\tau}_{max}]$. La matrice $\mathbf{W}^I$ est l'évaluation par intervalles de la matrice $\mathbf{W}$. Ces

composantes appartiennent toutes à des intervalles.

Nous avons mis en évidence dans la section 2.3.2 que les déplacements des nœuds de la structure en treillis sont exprimés en fonction du chargement extérieur appliqué sur la structure (Eq. 2.5). Dans notre contexte, ce chargement extérieur représente la tension dans les câbles. Par ailleurs, les déformations dans les barres sont des fonctions linéaires du déplacement des nœuds et les contraintes sont directement liées aux déformations. Il est donc possible d'exprimer la relation entre les contraintes dans les barres et les tensions dans les câbles sous la forme :

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{T}\boldsymbol{\tau} \tag{2.10}$$

où $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1, ..., \sigma_b]^T$ est le vecteur de contraintes dans les barres. La matrice $\mathbf{T}$, que l'on appelle par la suite matrice des contraintes, dépend de la pose $\mathbf{x}$ de l'effecteur. Les conditions exprimées dans (2.4), (2.7) et (2.8) formeront un intervalle $\boldsymbol{\Sigma} = \left[-\max\left(\sigma_0, |\sigma_c|, |\sigma_f|\right), \min\left(\sigma_0, \sigma_t\right)\right]$ pour une architecture donnée du treillis. Les composantes de $\boldsymbol{\tau}$ sont également décrites par des intervalles. Par conséquent, l'analyse structurelle, y compris la validation de l'instrumentation, peut être traitée en utilisant l'algèbre des intervalles. Avec cette approche, le comportement du treillis peut être vérifié sur l'ensemble de l'espace de travail.

Il est important de noter qu'il est indispensable de considérer à la fois la contrainte des torseurs admissibles et les contraintes liées à la structure en treillis et son instrumentation, en utilisant les expressions (2.1) et (2.10). Si, par exemple, ces deux expressions sont combinées en substituant le vecteur des tensions $\boldsymbol{\tau}$ de l'expression (2.1) dans l'équation (2.10), on obtient une nouvelle relation entre le torseur $\mathbf{f}$ et les contraintes $\boldsymbol{\sigma}$ dans les barres. Si l'analyse de l'espace de travail du robot à câbles instrumenté est basée uniquement sur ce nouveau système d'équations, il est possible que dans certaines poses de l'espace de travail, les contraintes dans les barres soient admissibles, alors que celles dans les câbles ne le soient pas. Par conséquent, les deux expressions doivent être prises en compte simultanément dans l'analyse de l'espace de travail.

2.4.3 Algorithme proposé

On propose d'estimer simultanément les contraintes associées au mécanisme i.e. les limites des tensions admissibles dans les câbles, ainsi que les contraintes associées à la structure en treillis instrumentée. L'interférence des câbles avec la structure en treillis est aussi évaluée. L'algorithme développé combine les algorithmes proposés dans [Gouttefarde 2007] et [Merlet 2006], en y ajoutant la validation des contraintes structurelles.

Soit $\mathscr{W}$ l'espace de travail de dimension n à analyser. Il est représenté par un vecteur d'intervalles que l'on appelle boîte. Cette boîte est découpée en un ensemble de boites $\mathscr{B}_i$, $i \in [1, p]$ suivant l'algorithme présenté sous forme de pseudo-code (cf. Algorithme 2.1).

Dans la procédure *Compute_DistanceVector*, la distance entre l'effecteur et les barres du

Algorithme 2.1 Analyse des contraintes basée sur une approche par intervalles.

1. $i = 1$, $p = 1$, $\mathscr{B}_1 = \mathscr{W}$
2. **While** $i \leq p$ **do**
3. $\quad \mathbf{d}^I = \left[d_1^I, ..., d_b^I\right] = Compute_DistanceVector\,(\mathscr{B}_i)$
4. $\quad$ **if** $\exists j \in [1, b] \mid \min\left(d_j^I\right) \leq d_s$ **go to** step 10
5. $\quad$ **else** $\mathbf{W}^I = Compute_WrenchMatrix\,(\mathscr{B}_i)$
6. $\quad$ **if** $Out\left(\mathbf{W}^I, \mathbf{f}^I, \boldsymbol{\tau}^I\right) = 1$ then $i = i + 1$, **go to** step 2
7. $\quad$ **else** **if** Feasibility$\left(\mathbf{W}^I, \mathbf{f}^I, \boldsymbol{\tau}^I\right) = 0$ **go to** step 10
8. $\quad\quad$ **else** **if** $Compute_Structure(\mathscr{B}_i) = 0$ **go to** step 10
9. $\quad\quad\quad$ **else** $i = i + 1$, **go to** step 2
10. $\quad$ **if** the width of all components of $\mathscr{B}_i$ is lower than a threshold δ then **return** 0
11. $\quad$ **else** $Bisect\,(\mathscr{B}_i)$, $p = p + 2$, $i = i + 1$, **go to** step 2

treillis est évaluée par intervalles, en calculant les minorants et les majorants du vecteur $\mathbf{d}^I$ à une boîte de poses $\mathscr{B}_i$ donnée. Une distance d_s de sécurité est prise en considération afin de déterminer l'interférence. La procédure *Compute_WrenchMatrix* permet l'évaluation par intervalles de la matrice des torseurs unitaires $\mathbf{W}^I$. Dans l'étape 6, la fonction Out teste l'inclusion de $\mathbf{f}^I$ dans $\mathbf{W}^I\boldsymbol{\tau}^I$. Si l'inclusion est vérifiée, la fonction *Out* renvoie 0. La procédure *Feasability* contient l'implémentation du théorème de Rohn : le système d'équations linéaires à paramètres intervalles $\mathbf{W}^I\boldsymbol{\tau} = \mathbf{f}^I$ est faisable si et seulement si les 2^n systèmes d'équations linéaires $\mathbf{W}_Y\boldsymbol{\tau} = \mathbf{f}_Y$ sont faisables, où $\mathbf{W}_Y$ et $\mathbf{f}_Y$ sont respectivement les matrices adjacentes de $\mathbf{W}^I$ et les vecteurs adjacents $\mathbf{f}^I$.

La procédure *Compute_Structure* utilise les 2^n solutions $\boldsymbol{\tau}$ obtenues durant l'évaluation de la faisabilité dans l'étape 7. Ces solutions sont multipliées par $\mathbf{T}^I$ qui représente l'évaluation par intervalles de la matrice des contraintes $\mathbf{T}$ pour obtenir les 2^n vecteurs intervalles $\boldsymbol{\sigma}^I$ de contraintes. Si au moins un des 2^n vecteurs intervalles de contraintes n'est pas inclus dans l'intervalle $\boldsymbol{\Sigma}$, la procédure *Compute_Structure* renvoie 0 dans l'étape 8.

Dans la procédure *Compute_Structure*, une surestimation de la matrice des contraintes peut survenir à cause des calculs par intervalles, et par conséquent une bissection de la boîte $\mathscr{B}_i$ peut s'avérer nécessaire. Ce problème récurent dû aux calculs par intervalles est rencontré dans le calcul de l'ETG dans [Gouttefarde 2007].

Remarques

Une variante de l'algorithme pourrait être considérée pour analyser la structure. Étant donné que $\boldsymbol{\Sigma}$ est connu pour une structure donnée, les tensions dans les câbles, caractérisées par le vecteur intervalle ${\boldsymbol{\tau}_s}^I$ que la structure est capable de supporter peuvent être calculées en inversant l'équation (2.10) : ${\boldsymbol{\tau}_s}^I = \mathbf{V}^I\boldsymbol{\Sigma}$ avec $\mathbf{V} = \mathbf{T}^{-1}$. Si les 2^n solutions $\boldsymbol{\tau}$ du système d'équations linéaires $\mathbf{W}_Y\boldsymbol{\tau} = \mathbf{f}_Y$ sont admissibles, il est donc possible d'examiner la faisabilité de la structure vis-à-vis de ces tensions, en vérifiant si les 2^n solutions $\boldsymbol{\tau} \in \boldsymbol{\tau}_s^I$. Cela peut en fait

induire en erreur car le vecteur intervalle $\boldsymbol{\tau}_s^I$ risque d'être surestimé.

De manière générale, on pourrait inclure dans la procédure *Compute_DistanceVector* l'évaluation de l'interférence entre les différents éléments de la structure : câble-câble, câbles-effecteur et câbles-treillis. Cette problématique d'interférences est plutôt complexe dans le cas général. Dans les exemples présentés ci-après, on considère uniquement l'interférence entre les éléments du treillis et l'effecteur dans le contexte des mécanismes plans.

L'implémentation de l'algorithme 2.1 sur les deux exemples est effectuée sous MATLAB avec la toolbox d'algèbre des intervalles INTLAB [Int 2012]. Sur une machine de CPU (Intel Core^{TM} Duo Processor T8300, 2.4 GHz), le temps de calcul pour ces deux exemples est d'environ 15 minutes. Avec une implémentation utilisant la librairie BIAS/PROFIL C++ [BIA 2012], le temps de calcul est uniquement de 11 s.

2.4.4 Exemples

Nous proposons à travers ces deux exemples d'analyser deux géométries différentes de la structure en treillis.

Exemple 1 : robot plan à 2 ddl avec une structure en treillis à 3 barres

Dans cet exemple, on considère un robot plan à 2 ddl avec une structure en treillis à 3 barres, illustré par la Figure 2.6. La position des points d'attache A_i, $i \in [1,3]$ est répartie de manière uniforme sur un cercle de rayon R. La plate-forme est assimilée à un point matériel et les barres du treillis sont des poutres cylindriques de diamètre ϕ, choisies identiques. On considère comme données d'entrée l'espace de travail désiré $\mathcal{W}$, les efforts $\mathbf{f}^I$ appliqués sur l'effecteur, les tensions admissibles $\boldsymbol{\tau}^I$ dans les câbles et les paramètres associés à l'utilisation du treillis (cf. Tableau 2.1).

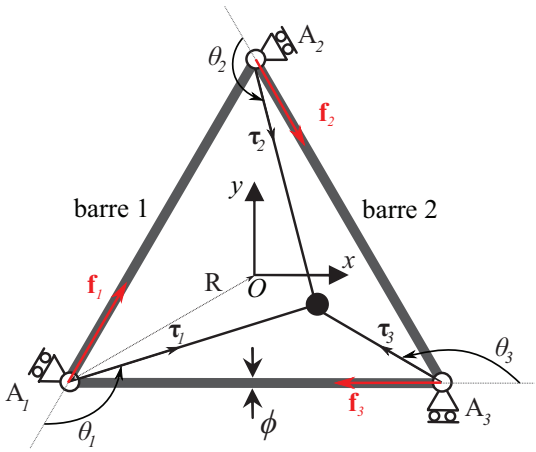

FIGURE 2.6 – Exemple d'un manipulateur à 3 câbles avec une structure en treillis à 3 barres.

	$\boldsymbol{\tau}^I$ (N)	$\mathbf{f}^I$ (N)	$\mathscr{W}$ (mm)	E (GPa)	ϵ_0	ϕ	R (mm)
Jeu #1	$\begin{bmatrix}[1,100]\\[1,100]\\[1,100]\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}[-10,10]\\[-10,10]\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}[-12.5,12.5]\\[-12.5,12.5]\end{bmatrix}$	3	6.10^{-3}	3	27.5
Jeu #2	$\begin{bmatrix}[1,100]\\[1,100]\\[1,100]\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}[-10,10]\\[-10,10]\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}[-12.5,12.5]\\[-12.5,12.5]\end{bmatrix}$	3	6.10^{-3}	3.8	27.5
Jeu #3	$\begin{bmatrix}[1,100]\\[1,100]\\[1,100]\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}[-10,10]\\[-10,10]\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}[-12.5,12.5]\\[-12.5,12.5]\end{bmatrix}$	3	6.10^{-3}	4.3	26
jeu #4	$\begin{bmatrix}[1,230]\\[1,230]\\[1,230]\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}[-10,10]\\[-10,10]\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}[-12.5,12.5]\\[-12.5,12.5]\end{bmatrix}$	3	6.10^{-3}	4.3	26

Tableau 2.1 – Paramètres du mécanisme.

Soit $\boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix}\tau_1 & \tau_2 & \tau_3\end{pmatrix}^T$ le vecteur des tensions dans les câbles. L'angle en A_i entre le câble i et la barre i (voir orientations sur la Figure 2.6) est noté θ_i. La force de compression dans chaque barre i est notée $\mathbf{f}_i$ avec f_i son module. On cherche à déterminer la relation entre les contraintes dans les barres et les tensions dans les câbles, exprimée par l'équation (2.10). L'équilibre statique et les conditions limites dans chaque liaison nous permettent d'exprimer la relation entre les tensions dans les câbles et les efforts dans les barres. Pour chaque liaison i, la projection des efforts et des tensions dans la barre i donne :

$$\begin{cases} f_1 - \dfrac{f_3}{2} = \tau_1 \cos\theta_1 \\ f_2 - \dfrac{f_1}{2} = \tau_2 \cos\theta_2 \\ f_3 - \dfrac{f_2}{2} = \tau_3 \cos\theta_3 \end{cases} \tag{2.11}$$

Pour chaque barre i, la relation entre la force interne et la contrainte est exprimée par :

$$\sigma_i = \frac{f_i}{S_i} \tag{2.12}$$

où S_i est la section de la barre i, considérée identique pour toutes les barres. On peut alors exprimer facilement la matrice des contraintes $\mathbf{T}$ par la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\end{pmatrix} = \frac{1}{S_i}\begin{pmatrix}\frac{8}{7}\cos\theta_1 & \frac{2}{7}\cos\theta_2 & \frac{4}{7}\cos\theta_3\\ \frac{4}{7}\cos\theta_1 & \frac{8}{7}\cos\theta_2 & \frac{2}{7}\cos\theta_3\\ \frac{2}{7}\cos\theta_1 & \frac{4}{7}\cos\theta_2 & \frac{8}{7}\cos\theta_3\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\tau_1\\ \tau_2\\ \tau_3\end{pmatrix} \tag{2.13}$$

La matrice $\mathbf{T}$ dépend des angles θ_i qui dépendent de la position de l'effecteur.

Avec le premier jeu de paramètres (jeu #1, Tableau 2.1), une portion de l'espace de travail n'est pas valide en raison du flambage de la structure (cf. Figure 2.7). Sur cette figure, on observe une dissymétrie dans l'espace de travail où les contraintes sur le flambage ne sont pas respectées. Cette dissymétrie est due à la disposition des liaisons glissières sur la structure en treillis : par exemple, les deux liaisons glissières dont la position est définie par les points A_1 et A_3 ne sont pas symétriques par rapport au plan (Oyz) de la Figure 2.6.

Avec un diamètre des barres plus grand (jeu #2, Tableau 2.1), le flambage de la structure ne pose plus de problème (cf. Figure 2.8). La seule légère restriction de l'espace de travail est due aux tensions dans les câbles. Cependant, une analyse approfondie nous montre que l'étendue de mesure du capteur $\epsilon_0 = 6.10^{-3}$ est plus grande que la déformation maximale $\epsilon = 3.10^{-3}$ rencontrée. En d'autres termes, la structure n'est pas adaptée à l'étendue de mesure du capteur, qui dépend des spécifications des constructeurs. Il est en effet logique de ne pas avoir en même temps une déformation satisfaisante tout en évitant le flambage : nous avons un paramètre à régler pour deux contraintes.

Dans le troisième jeu de paramètres (jeu #3, Tableau 2.1), le diamètre ϕ de la barre et le rayon R du mécanisme sont modifiés. Ces valeurs permettent d'obtenir une déformation correcte pour être mesurée, avec un maximum de déformation égale à $5.4.10^{-3}$. De plus, aucun flambage de la structure ne se produit (cf. Figure 2.9). La structure semble adéquate pour l'application. Néanmoins, la modification du rayon R provoque des tensions plus élevées dans les câbles comme le montre la Figure 2.9-A : l'espace de travail est plus petit par rapport

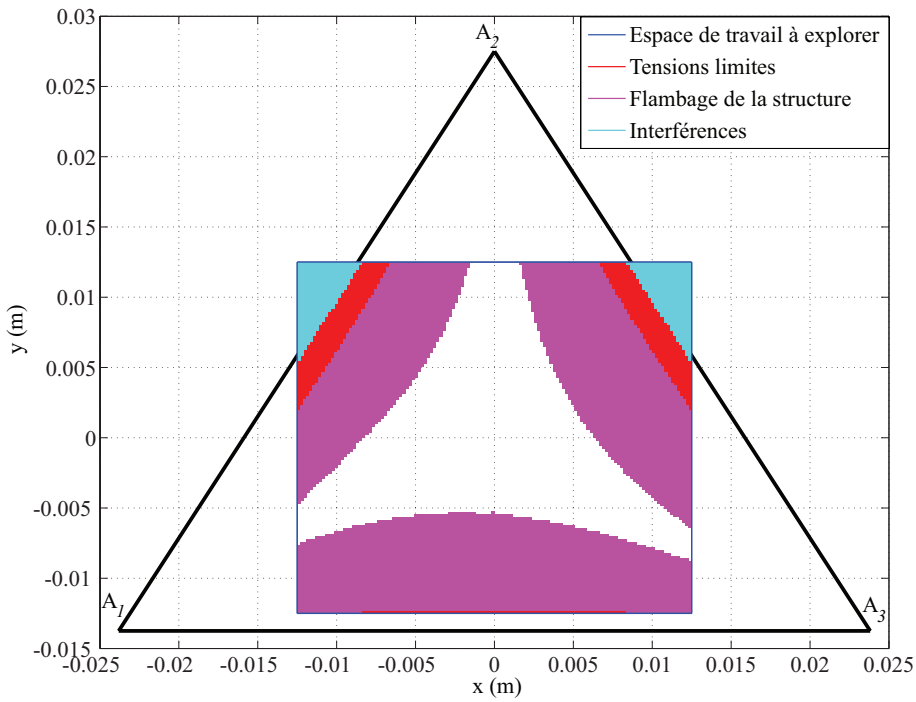

FIGURE 2.7 – Premier exemple - Analyse de l'espace de travail avec le 1er jeu de paramètres.

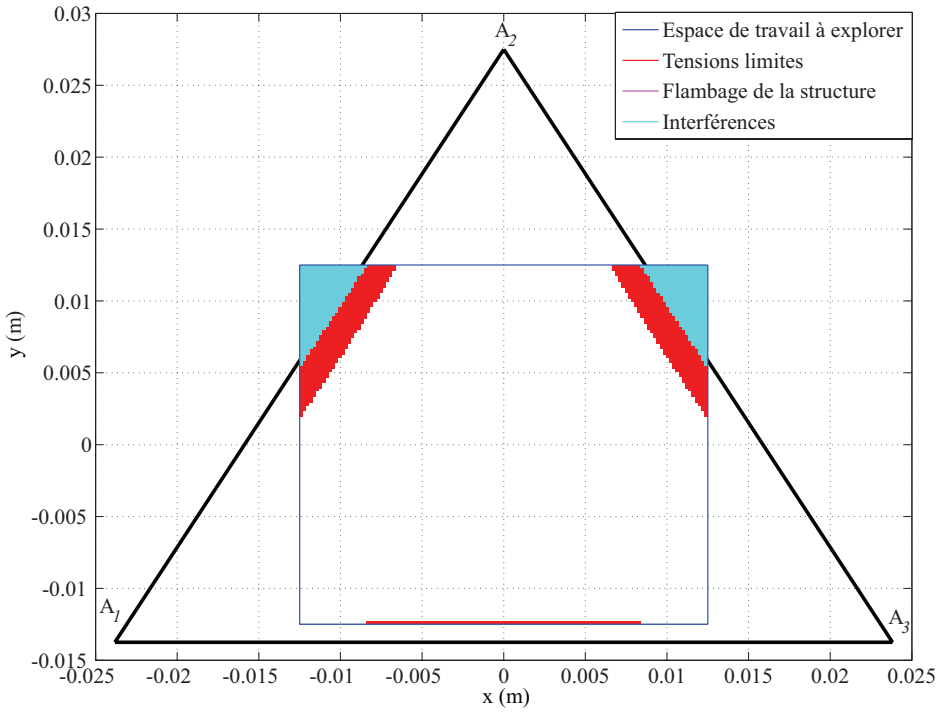

FIGURE 2.8 – Premier exemple - Analyse de l'espace de travail avec le 2ème jeu de paramètres.

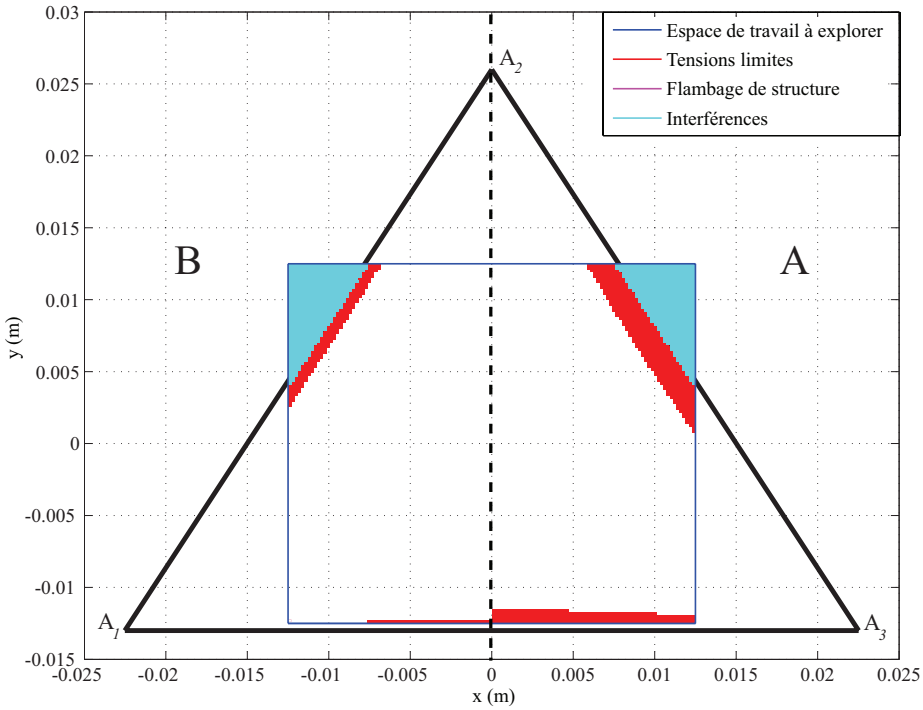

FIGURE 2.9 – Premier exemple - Analyse de l'espace de travail avec les 3ème et 4ème jeux de paramètres.

à celui représenté dans la Figure 2.8. Cela montre la nécessité de considérer simultanément la contrainte des torseurs admissibles et les contraintes structurelles : sans modifier le rayon R, il n'est pas possible d'obtenir une déformation adéquate et la modification de la valeur R peut entraîner des tensions excessives dans les câbles. La Figure 2.9-B montre que si les tensions admissibles sont modifiées (jeu #4, Tableau 2.1), l'espace de travail est uniquement limité par les interférences de l'effecteur avec la structure.

Exemple 2 : robot plan à 2 ddl avec une structure en treillis à 9 barres

Dans cet exemple, le robot considéré est toujours à 2 ddl mais avec une structure en treillis à 9 barres (cf. Figure 2.10, à gauche). Les câbles sont placés dans un plan situé au dessus/dessous de la structure pour éviter leur interférence avec les barres du treillis. La structure en treillis considérée peut présenter un grand intérêt car, contrairement à la structure présentée dans le premier exemple, quelques barres sont en traction et non pas en compression : on peut par conséquent utiliser les barres en traction pour effecteur la mesure et renforcer les barres en compression afin d'éviter leur flambage.

L'évaluation de l'ETG nécessite uniquement de connaitre la position des points d'attache A_i, $i \in [1,3]$ sur la base. L'évaluation est donc indépendante du nombre de barres du treillis et de leur disposition. Sur la Figure 2.10, à droite, l'espace de travail est limité d'un côté par les tensions limites dans les câbles, et de l'autre côté par l'interférence entre l'effecteur et les barres du treillis. Ce résultat montre la nécessité d'intégrer la contrainte d'interférence entre les éléments de la structure en treillis et ceux du robot à câbles dans l'analyse de l'espace de travail. De toute évidence, le choix de la géométrie de la structure en treillis a une influence

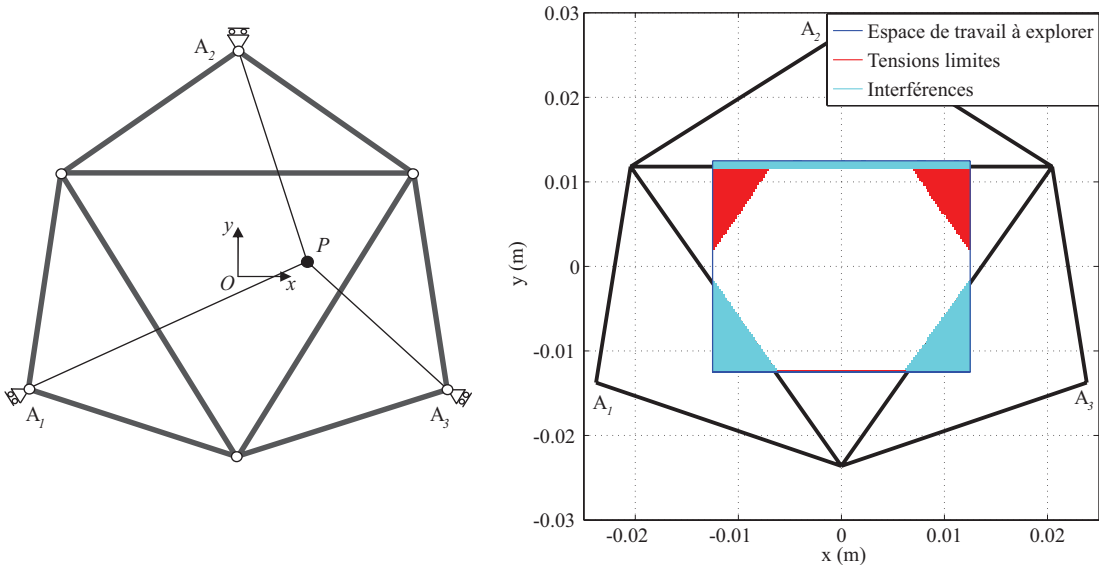

FIGURE 2.10 – À gauche, robot plan à 2 ddl avec une structure en treillis à 9 barres. À droite, analyse de l'espace de travail (ETG).

sur l'espace de travail du mécanisme.

2.4.5 Conclusion

À travers le premier exemple, nous avons montré la nécessité de considérer simultanément la contrainte des torseurs admissibles et les contraintes structurelles dans la phase de caractérisation de l'espace de travail du robot à câbles instrumenté. Cette phase de caractérisation est cruciale car elle va permettre de formuler le problème d'optimisation de manière cohérente. Sans passer par cette phase, il aurait été tout à fait envisageable de procéder à une optimisation disjointe en deux temps, c'est-à-dire en optimisant d'abord la géométrie du robot puis en choisissant la structure en treillis instrumentée en conséquence. Ce découpage dans l'optimisation risque donc de devenir un problème potentiel : une solution optimale pour un ensemble donné de contraintes risque de compromettre les autres.

La prochaine étape serait l'optimisation géométrique et structurelle en utilisant l'approche par intervalles. Dans ce travail, nous n'avons pas proposé un tel algorithme. Une telle procédure d'optimisation serait en effet lourde en temps de calcul surtout si plusieurs paramètres sont considérés. De plus, le temps de calcul serait fortement dépendant de l'implémentation [Merlet 2009]. Nous avons cependant proposé une solution alternative pour effectuer l'optimisation, dans le cas d'une mesure de déplacement comme exposé ci-après.

2.5 Cas d'une mesure de déplacement

Sur un plan technologique, les déplacements possibles à mesurer sont de l'ordre de quelques centaines de microns. Vue la longueur des barres du treillis, il n'est pas possible de mesurer les déplacements directement dans la structure. Une possibilité pour pallier le problème est de concevoir une cellule de mesure dédiée que l'on intègre dans la structure afin d'amplifier ces mouvements. Le rapport d'amplification est choisi de sorte à ce que les déplacements soient observables et que l'étendue de mesure du capteur employé soit bien exploitée.

Le choix de la structure en treillis et la réalisation de l'instrumentation en utilisant une cellule de mesure adaptée peuvent être alors étudiés séparément. Cela vient du fait qu'on peut choisir une structure en treillis dont la section des barres permet d'éviter le flambage, puis réaliser l'instrumentation en conséquence. Dès lors, il est possible de scinder en deux la démarche de conception, d'une part pour optimiser la géométrie du robot à câbles en considérant les 3 contraintes usuelles, et d'autre part pour réaliser l'instrumentation de la structure en treillis. Le choix d'une méthode d'optimisation géométrique du robot à câbles est discuté ci-après tandis que le l'instrumentation est développée dans le chapitre suivant.

2.5.1 Besoin d'une méthode d'optimisation du robot à câbles

Peu de travaux s'intéressent au problème de l'optimisation lors de la conception des mécanismes à câbles. Dans [Gouttefarde 2008], l'approche par intervalles est utilisée pour déterminer les géométries possibles d'un mécanisme plan entrainé 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 la tâche est un hyper-ellipsoïde ou un disque, comme c'est le cas de notre application. Une autre approche est considérée dans [Bouchard 2008b] avec le développement d'un algorithme d'optimisation basé sur un algorithme génétique. Après discrétisation de l'espace de travail, l'inclusion de l'ETT dans l'ETD est vérifiée. Néanmoins, la discrétisation est très couteuse en temps de calcul lorsque le nombre de ddl augmente.

En conséquence, nous proposons une méthode de conception qui se décompose en deux phases. La première phase 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 [Bosscher 2006] afin de déterminer les paramètres de conception optimaux en utilisant un ensemble de poses de l'effecteur obtenu sans avoir recours à la discrétisation systématique. La deuxième phase consiste à valider les résultats obtenus précédemment en utilisant une approche par intervalles.

2.5.2 Formulation du problème

Considérons un mécanisme à n ddl entrainé par m câbles. Sa géométrie est définie par la position des points d'attache à la base et à la plate-forme, exprimés dans un ensemble de paramètres $\boldsymbol{\xi}$. À une pose donnée $\mathbf{x}$ de la plate-forme, l'ensemble $\mathscr{D}$ des torseurs disponibles $\mathbf{f}$ que les câbles peuvent générer sur la plate-forme est défini par :

$$\mathscr{D} = \{\mathbf{f} \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{f} = \mathbf{W}\boldsymbol{\tau},\ \tau_i \in [\tau_{i_{min}}, \tau_{i_{max}}],\ 1 \leq i \leq m\} \tag{2.14}$$

L'ensemble $\mathscr{D}$ est délimité par l'intersection de k hyperplans (droite, plan, hyperplan) qui constituent un zonotope [Bouchard 2008a]. Dans l'exemple de la Figure 2.11, les hyperplans dans l'espace des efforts sont des droites parallèles deux à deux. Ces hyperplans ont la même direction que les câbles.

Quelles que soient les dimensions, ces hyperplans peuvent être caractérisés analytiquement par la méthode de translation des hyperplans, composée de 3 étapes [Bouchard 2008a]. D'abord, le vecteur unitaire $\mathbf{c}_i$ perpendiculaire à l'hyperplan i est déterminé (cf. Figure 2.11). Ensuite, la position de l'hyperplan H_i est définie au moyen d'un point P_i appartenant à cet hyperplan. Ces deux étapes sont répétées afin de définir tous les hyperplans possibles. Enfin, les distances d_{io} entre l'origine et les différents hyperplans sont calculées par la relation :

$$\mathrm{d}_{io} = \mathbf{c}_i{}^T \mathbf{p}_i \tag{2.15}$$

où $\mathbf{p}_i$ est le vecteur définissant les coordonnées du point P_i. Ces distances sont fonctions de la

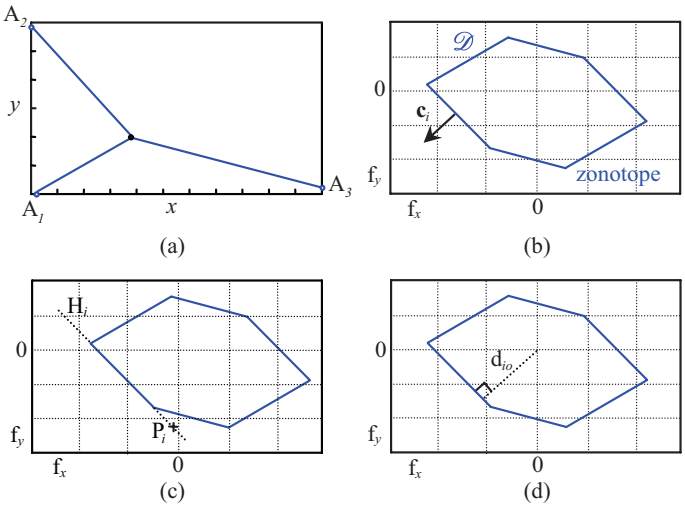

FIGURE 2.11 – Exemple de caractérisation de l'ensemble des torseurs disponibles par un zonotope, (a) mécanisme plan $n = 2$ et $m = 3$, (b-d) application de la méthode de translation des hyperplans pour caractériser le zonotope.

pose $\mathbf{x}$ de la plate-forme et de l'ensemble des paramètres géométriques $\boldsymbol{\xi}$, soit $\mathrm{d}_{io} = \mathrm{d}_{io}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$. D'après [Bouchard 2008a], un torseur donné $\mathbf{f}_0$ peut être généré si et seulement si :

$$\mathbf{C}\mathbf{f}_0 \leq \mathbf{D}_o \tag{2.16}$$

avec $\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1, \ldots \mathbf{c}_k]^T$ et $\mathbf{D}_o = [\mathrm{d}_{1o}, \ldots \mathrm{d}_{ko}]^T$, k étant le nombre des hyperplans. Le calcul de k est exprimé dans [Bosscher 2006] par la relation : $k = 2\frac{m!}{(n-1)!(m-n+1)!}$. La condition (2.16) est vérifiée si et seulement si $\mathbf{c}_i^T \mathbf{f}_0 \leq \mathrm{d}_{io}$, $\forall i \in [1, k]$.

2.5.3 Algorithme d'optimisation

Dans la première phase de la méthode de conception, on cherche à déterminer l'ensemble des paramètres géométriques optimaux pour une tâche donnée. L'espace de travail requis $\mathscr{W}$ et l'ensemble des torseurs de la tâche $\mathscr{T}$ sont des données d'entrées de l'algorithme. Le mécanisme est défini par l'ensemble des paramètres géométriques $\boldsymbol{\xi}$. L'algorithme est décomposé en deux étapes (cf. Algorithme 2.2).

Algorithme 2.2 Optimisation de la géométrie du robot.

Étape 1 : $\mathbf{x}_i = \underset{\mathbf{x} \in \mathscr{W}}{\operatorname{argmin}} \quad \mathrm{d}_i\left(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}_0\right) \quad 1 \leq i \leq k$

Étape 2 :
$$\begin{cases} \boldsymbol{\xi}_{op} = \underset{\boldsymbol{\xi}}{\operatorname{argmin}} \quad \text{volume}\,(\boldsymbol{\xi}) \\ \text{sous :} \quad \mathrm{d}_i\,(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\xi}) \geq 0 \qquad\qquad 1 \leq i \leq k \end{cases}$$

Dans la première étape, pour un jeu initial de paramètres $\boldsymbol{\xi}_0$, un 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. La distance d_i représente la distance entre la facette i du zonotope et la bordure de $\mathscr{T}$. Dans la deuxième étape, un ensemble de paramètres optimaux $\boldsymbol{\xi}_{op}$ 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 $\boldsymbol{\xi}_{op}$ pour lequel nous avons une inclusion intégrale de $\mathscr{T} \subseteq \mathscr{D}$ aux positions critiques $\mathbf{x}_i$, $i \in [1, k]$ de la plate-forme. Ces deux étapes sont illustrées dans la Figure 2.12.

Étant donné que l'ensemble des paramètres géométriques optimaux $\boldsymbol{\xi}_{op}$ permet de satisfaire l'inclusion de $\mathscr{T} \subseteq \mathscr{D}$ uniquement pour certaines poses critiques de l'effecteur, une vérification de l'inclusion sur tout l'espace de travail doit être effectuée. Cette vérification, basée sur une approche par intervalles, constitue la deuxième phase de la méthode de conception. Elle permet entre autre de palier le problème de découpage en deux de la procédure d'optimisation. L'approche, développée dans l'algorithme 2.3, consiste donc à vérifier si les distances d_i, $i \in [1, k]$ évaluées par intervalles sont positives sur l'ensemble de l'espace de travail. Ainsi on peut déterminer si la géométrie optimale du robot, caractérisée par $\boldsymbol{\xi}_{op}$, satisfait la tâche désirée sur l'ensemble l'espace de travail.

Comme chaque distance d_i dépend de la pose $\mathbf{x}$ de l'effecteur, l'évaluation par intervalles de celle-ci produit un intervalle $\mathrm{d}_i^I(\mathbf{x}^I)$. Dans l'étape 3, l'évaluation par intervalles de toutes les distances pour l'intervalle $\mathscr{B}_i$ est calculée. L'ensemble des torseurs de la tâche est consi-

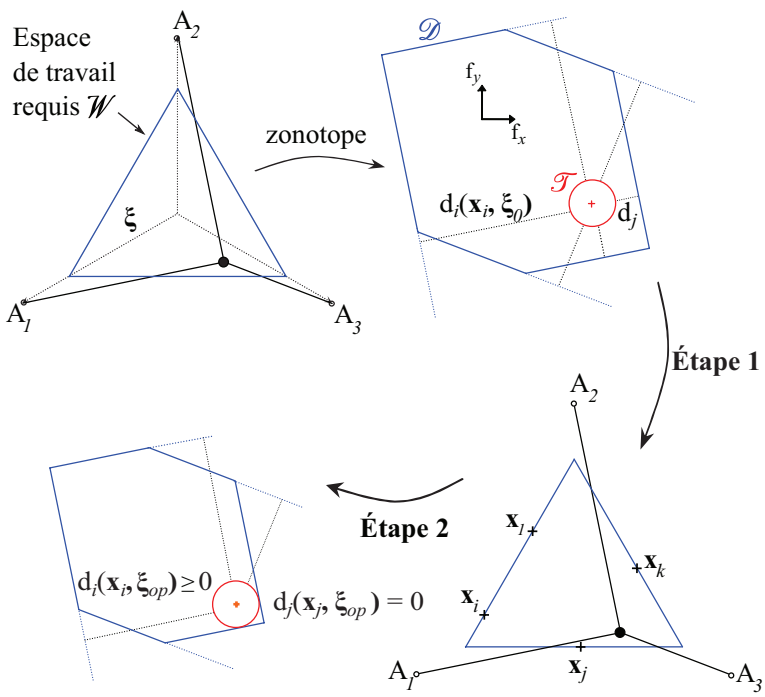

FIGURE 2.12 – Procédure d'optimisation.

Algorithme 2.3 Approche de validation par intervalles.

1. $i = 1$, $p = 1$, $\mathscr{T}$, $\boldsymbol{\xi}_{op}$, $\mathscr{B}_1 = \mathscr{W}$
2. **While** $i \leq p$ **do**
3. $\mathbf{D}^I = \left[d_1^I\left(\mathscr{B}_i, \boldsymbol{\xi}_{op}\right), ..., d_k^I\left(\mathscr{B}_i, \boldsymbol{\xi}_{op}\right)\right]$
4. **if** $\left(\min\left(\inf\left(\mathbf{D}^I\right)\right) \geq 0\right)$ then $\mathscr{L}_{in} \leftarrow \mathscr{B}_i$, $i = i + 1$, **go to** step 2
5. **else** **if** the width of all components of $\mathscr{B}_i$ is lower than a threshold δ then **return** 0
6. **else** $Bisect(\mathscr{B}_i)$, $p = p + 2$, $i = i + 1$, **go to** step 2

déré inclus dans l'ensemble des torseurs disponibles pour l'intervalle $\mathscr{B}_i$ 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 des outils de l'algèbre des intervalles et, par conséquent, si le minimum de la borne inférieure de $\mathbf{D}^I$ est négatif, un bi-sectionnement de $\mathscr{B}_i$ est effectué. Le processus de bi-sectionnement est arrêté lorsque le minimum de la borne inférieure de $\mathbf{D}^I$ est positif ou bien la largeur de toutes les composantes de $\mathscr{B}_i$ est inférieure à un seuil δ.

Il est tout a fait probable qu'après optimisation des paramètres géométriques, une portion de l'espace de travail requis ne soit pas valide. Ce problème risque d'arriver car le découpage en deux de la procédure d'optimisation n'est pas pleinement satisfaisant. Pour résoudre ce problème, une itération de l'algorithme d'optimisation est considérée. Les nouvelles positions critiques apparues dans la phase de validation sont incluses dans l'ensemble des poses critiques à la deuxième étape d'optimisation. Une fois l'optimisation effectuée, la procédure de validation est alors répétée.

2.5.4 Application

La méthode de conception présentée est employée pour déterminer l'architecture optimale pour notre application.Trois architectures candidates sont considérées (cf. Figure 2.13). 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 d'aiguille et est considéré égal à 5 mm.

Phase 1 : optimisation

À partir de la tâche de positionnement de l'aiguille, décrite dans la section 1.1.2, nous allons définir l'espace de travail requis pour le mécanisme. La distance entre le plan du mécanisme et la grille de positionnement est choisie de sorte à ce que l'orientation maximale de $\pm 30^\circ$de l'aiguille au bord du disque de diamètre 35 mm au niveau de la grille soit réalisable à partir du plan du mécanisme dans un cercle de diamètre 50 mm. Ainsi, l'insertion sans et avec orientation de l'aiguille peut être effectuée dans un même espace de travail du mécanisme, soit $\mathscr{W}$ égal à un disque de diamètre 50 mm.

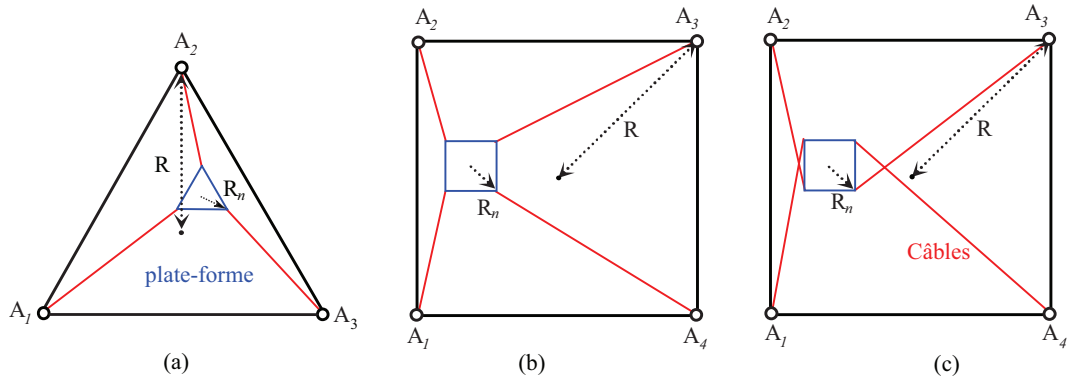

FIGURE 2.13 – (a) architecture triangulaire symétrique à 3 câbles, (b) architecture carrée à 4 câbles non croisés, (c) architecture carrée à 4 câbles croisés.

Durant l'insertion, l'aiguille est en interaction avec les tissus, le radiologue et le guide de l'aiguille. Nous considérons que les forces comprises dans le plan du mécanisme ont une direction quelconque et une amplitude maximale de 5 N. Ainsi, l'ETT peut être représenté dans l'espace des torseurs comme un disque de diamètre 5 N. Ces efforts sont contrebalancés par les tensions des câbles. Ces tensions sont limitées à 60 N, afin d'éviter de surdimensionner les actionneurs et les câbles. Une tension minimale de 10 N est considérée afin d'assurer une pré-tension correcte des câbles et éviter leur fléchissement. La tension τ_i dans chaque câble i est donc bornée : $\tau_i \in \left[\tau_{i_{min}}, \tau_{i_{max}}\right] = [10, 60]$ N.

Le zonotope est formé par l'intersection de k hyperplans. La distance d_i, avec $i \in [1, k]$, entre la facette i du zonotope et la bordure de l'ETT $\mathcal{T}$ est exprimée via la relation :

$$\mathrm{d}_i = \mathrm{d}_{io} - \|\mathbf{f}_0\|_{max} \tag{2.17}$$

Dans la première étape de l'optimisation, les positions critiques $\mathbf{x}_i$ de l'effecteur pour lesquelles les distances $\mathrm{d}_i; i \in [1, k]$ sont minimales sont déterminées. Dans la deuxième étape, la surface de la structure, qui est fonction du rayon R, est minimisée tout en considérant les distances d_i positives. Ces distances sont calculées à ces positions critiques $\mathbf{x}_i$.

Les valeurs optimales des paramètres géométriques exprimées par $\boldsymbol{\xi}_{op}$ sont notées dans le Tableau 2.2 avec en plus les dimensions de la base de chaque structure. Les résultats de la première étape de la procédure d'optimisation pour les trois architectures sont représentés dans la Figure 2.14(a). Pour chaque architecture, les k positions critiques sont déterminées. Certaines d'entre elles sont répétées. La Figure 2.14(b) montre le zonotope et l'ETT pour les positions de la plate-forme représentées dans les Figure 2.14(a) en utilisant les valeurs optimales de $\boldsymbol{\xi}_{op}$ pour chaque architecture. On peut observer le contact entre l'ETT et le l'ETD suite à l'optimisation.

Structure	(a)	(b)	(c)
ξ_{op} (mm)	69	49	51
Base (mm)	120	69	72

Tableau 2.2 – Paramètres géométriques optimaux.

Remarque

L'algorithme d'optimisation a été testé en partant d'une architecture triangulaire non symétrique, avec 3 rayons différents pour définir les points d'attache. Les paramètres géométriques optimaux convergent logiquement vers une seule valeur égale à $\boldsymbol{\xi}_{op}$ = 69 mm, la valeur déterminée dans le cas d'une architecture triangulaire symétrique.

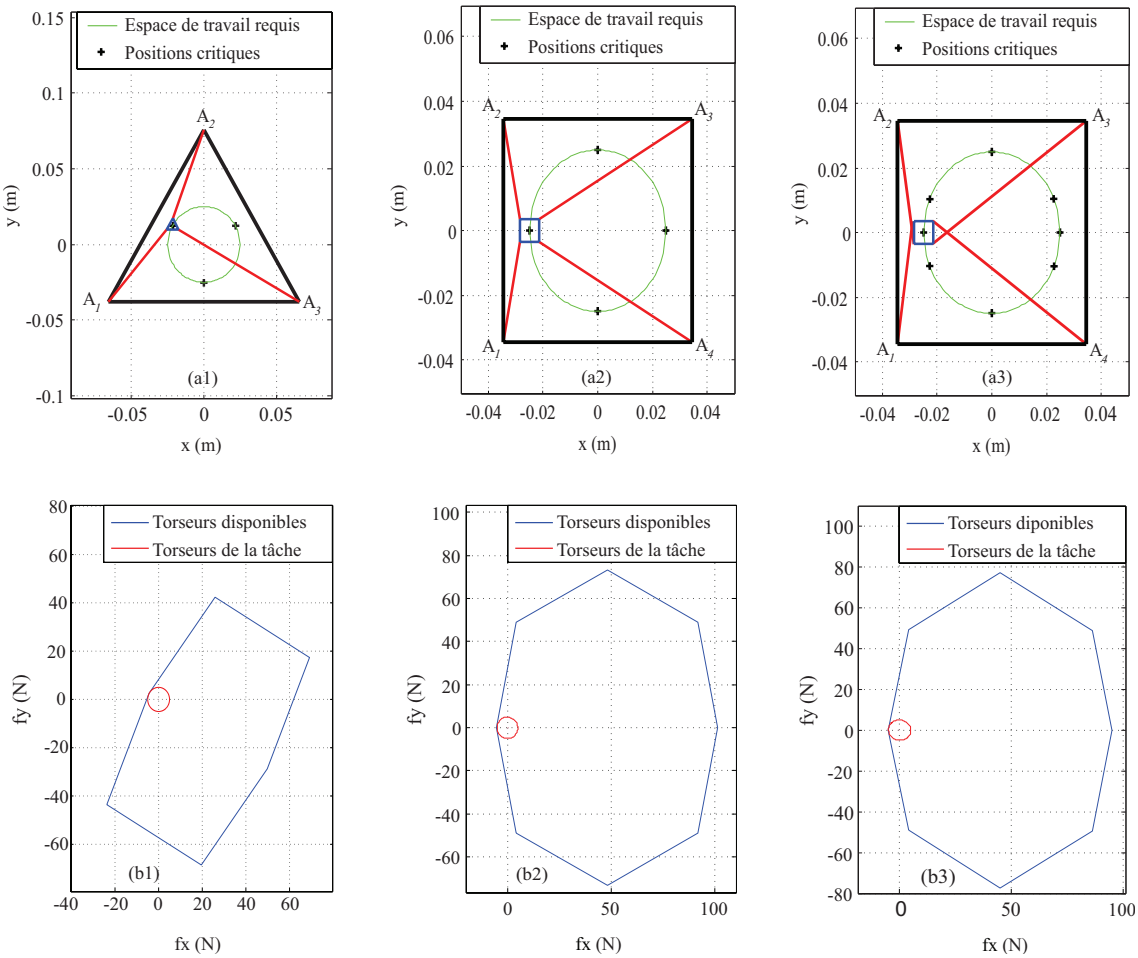

FIGURE 2.14 – (a) Positions critiques, (b) Distances minimales entre l'ensemble des torseurs de la tâche et l'ensemble des torseurs disponibles.

Phase 2 : validation des résultats en utilisant l'approche par intervalles

Les paramètres géométriques optimaux $\boldsymbol{\xi}_{op}$ déterminés pour chaque architecture sont utilisés comme données d'entrée pour l'algorithme 2.3. Les coordonnées polaires (r, θ) sont utilisées pour exprimer la forme circulaire de l'espace de travail en intervalles, avec $r \in [0, 25]$ mm et $\theta \in [0, 2\pi]$. Deux seuils d'arrêt $\delta_r = 1$ mm et $\delta_\theta = \pi/360$ sont utilisés pour arrêter le processus de bi-sectionnement. L'implémentation a été effectuée sur MATLAB en utilisant la boite à outils INTLAB [Int 2012].

L'analyse de l'espace de travail (cf. Figure 2.15(a-c)) montre qu'une petite partie de l'espace de travail n'est pas valide. En fait, ceci est du à l'évaluation par intervalles des distances qui produit souvent une surestimation des résultats. Une analyse locale montre que les bornes inférieures des distances évaluées par intervalles sont quasiment nulles mais encore négatives sur certains points. Ces distances ont été évaluées en considérant les boîtes non valides pour lesquelles le processus de bi-sectionnement a été arrêté à cause des seuils limites δ_r et δ_θ. Cependant, ces distances calculées exactement à ces points montrent que l'espace de travail désiré est valide. Par conséquent, un petit seuil devrait être inclus pour analyser ces distances et éviter ainsi tout artefact numérique.

Afin d'apprécier la différence de comportement entre les 3 mécanismes, ces derniers sont confrontés en utilisant un même paramètre $\boldsymbol{\xi}_{op}$, pris à la plus petite valeur $\boldsymbol{\xi}_{op}$ =49 mm. Comme le montre la Figure 2.15(d), une grande portion de l'espace de travail n'est pas valide pour la structure triangulaire. Ceci est dû aux tensions limites dans les câbles : les tensions nécessaires pour équilibrer l'ensemble des torseurs de la tâche dépassent les limites admissibles. Les deux structures carrées ont quasiment le même espace de travail. A première vue, la structure triangulaire paraît plus intéressante étant donné qu'une forme triangulaire est mieux adaptée entre les jambes du patient qu'une forme carrée. Cependant la taille minimale de la structure triangulaire qui permet de satisfaire l'espace de travail est finalement plus conséquente que celle des structures carrées, d'après la comparaison de la base des 3 structures. Par ailleurs, comme nous l'avons évoqué précédent, l'évaluation de la tension des câbles est possible en changeant le chemin conventionnel des câbles. Par conséquent, l'architecture avec des câbles croisée semble incompatible avec ce chemin non conventionnel. L'architecture carrée avec 4 câbles directs est finalement retenue.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une instrumentation originale d'un robot à câbles basée sur l'utilisation d'une structure en treillis déformable. Pour ce type de robot, nous avons défini des contraintes qui doivent être respectées dans l'analyse de l'espace de travail. Des contraintes structurelles s'ajoutent aux contraintes usuelles. Nous avons envisagé deux cas d'instrumentation et analysé l'impact d'utiliser une structure en treillis instrumentée sur la démarche de conception. Dans le cas d'une mesure de déformation, nous avons pu constater qu'il est nécessaire de prendre en compte différentes contraintes définissant l'espace de travail.

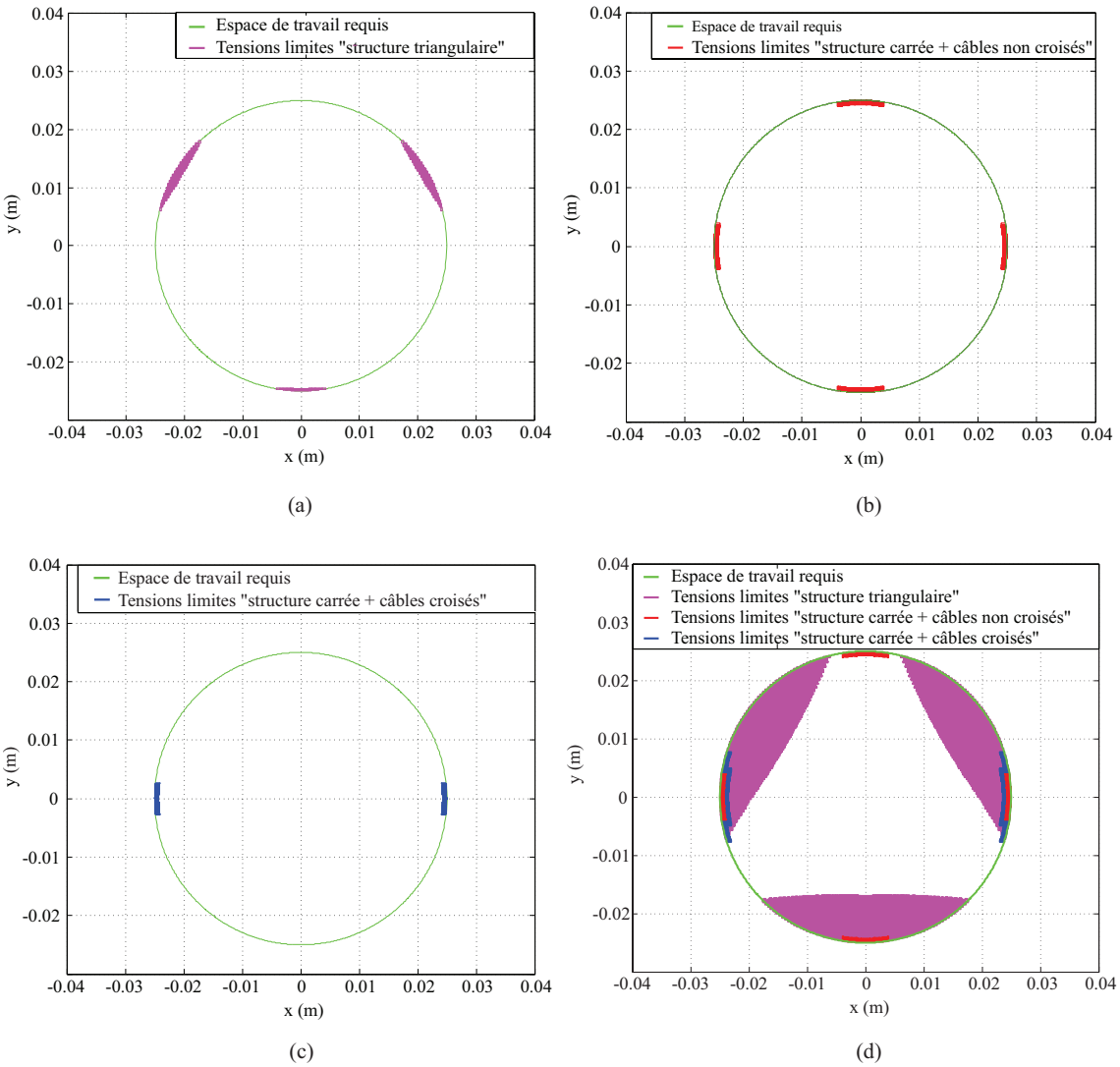

FIGURE 2.15 – Analyse de l'espace de travail (a) Structure triangulaire avec $\boldsymbol{\xi}_{op}$ =69 mm, (b) Structure carrée à 4 câbles non croisés avec $\boldsymbol{\xi}_{op}$ =49 mm, (c) Structure carrée à 4 câbles croisés avec $\boldsymbol{\xi}_{op}$ =51 mm, (d) Analyse de l'espace de travail des trois architectures en utilisant le même paramètre optimal $\boldsymbol{\xi}_{op}$ = 49mm.

Une méthode par intervalles a pour cela été proposée. Sur ce volet, l'étape suivante serait de développer une méthode d'optimisation, qui, partant de la méthode de caractérisation que nous avons proposée, permet de déterminer un jeu de paramètres optimaux pour une application. Une approche par intervalles pourrait être envisagée. Le problème reste ouvert notamment par rapport à la complexité de calcul. Dans le cas d'une mesure de déplacement, nous avons souligné que la démarche de conception peut se scinder en deux, d'une part la conception du robot à câbles, d'autre part la conception d'un mécanisme qui doit être intégré dans la structure pour rendre observable la mesure. Le besoin d'une méthode d'optimisation

adaptée à la conception d'un mécanisme à câbles est alors apparu. La méthode que nous avons proposée s'est avérée adaptée à notre contexte et sera intéressant d'envisager son emploi pour d'autre application. Concernant le dispositif MRGuide, une architecture carrée a été retenue après optimisation pour son moindre encombrement. Il s'agit maintenant de définir une forme de la structure en treillis et la conception d'une cellule de mesure. Cette partie est développée dans le chapitre suivant.

3 Le système de positionnement MRGuide

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la stratégie d'instrumentation du dispositif en particulier pour évaluer la tension des câbles. L'évaluation de la position de la plate-forme n'est quand à elle pas abordée dans ce manuscrit. Comme décrit dans [Abdelaziz 2012], la position de la plate-forme est évaluée en utilisant 4 codeurs à technologie optique. Chaque codeur est composé d'une roue codeuse et de deux capteurs optiques placés en quadrature afin d'augmenter la précision. L'erreur relative maximale de la position, évaluée théoriquement, est égale à 0.25%. Les roues codeuses sont fabriquées en tungstène afin d'assurer leurs compatibilité avec le scanner.

Concernant l'évaluation de la tension des câbles, nous proposons dans un premier temps d'analyser deux cinématiques de la structure en treillis afin de choisir la mieux appropriée. Ensuite, la stratégie de mesure retenue pour évaluer la tension des câbles est développée et évaluée expérimentalement sur un banc d'essai dédié. Après la validation expérimentale, le système de positionnement ainsi que les choix de conception sont détaillés. L'évaluation du prototype en terme de compatibilité avec le scanner est analysée. Enfin, le principe de l'instrumentation est évalué expérimentalement sur le prototype réalisé.

3.1 Technologies et instrumentation du dispositif

3.1.1 Choix de la structure en treillis

Étant donnée la géométrie du robot, la forme plus appropriée de la structure en treillis est carrée. Cette structure sera intégrée dans le bâti du dispositif robotique. Pour cela, nous proposons d'analyser deux schémas cinématiques de cette structure (s1) et (s2), illustrés dans la Figure 3.1. Pour la première cinématique (s1), la structure en treillis est connectée au bâti par des liaisons glissières. Ces liaisons permettent un découplage dans le système, i.e. les efforts de compression dans chaque barre dépendent uniquement de la tension d'un seul câble. Pour la deuxième cinématique (s2), chaque barre du treillis est connectée au bâti du dispositif d'un côté, et à la barre voisine de l'autre par une liaison glissière. Avec cette disposition des barres,

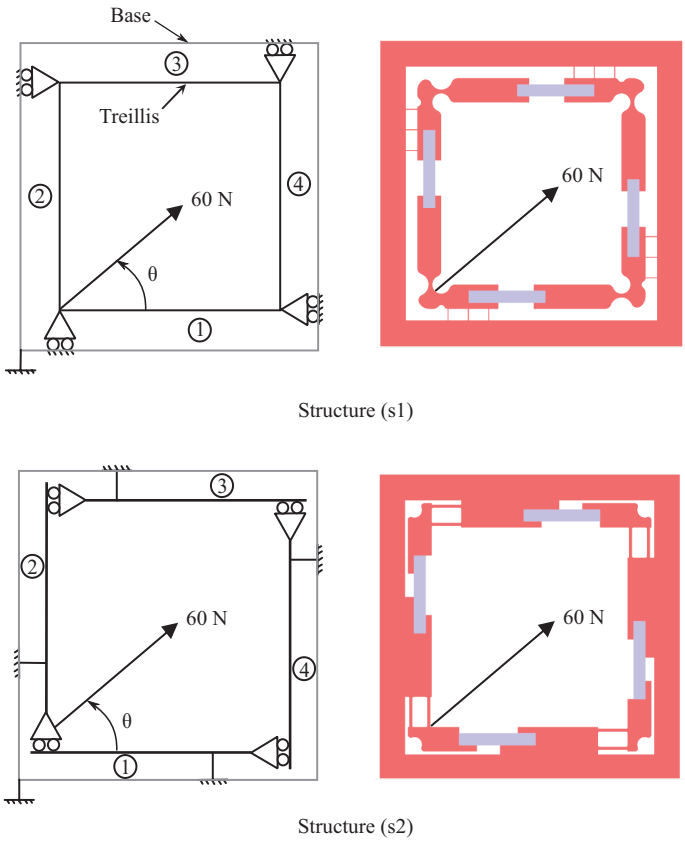

FIGURE 3.1 – Schémas cinématiques et CAO du mécanisme compliant pour les deux structures proposées.

le découplage dans le système est également obtenu.

Afin de sélectionner l'une des deux cinématiques, nous proposons de comparer la précision de calcul de la tension des câbles, déterminée à partir des efforts dans les barres. Cette précision est estimée par simulation avec une méthode des éléments finis en utilisant le logiciel PTC Pro/Mechanica. Les dimensions des deux treillis, la section des barres et les matériaux utilisées sont choisis identiques. La comparaison est basée sur l'analyse du comportement des deux structures en treillis soumises à une force appliquée à un de ses coins, comme le montre la Figure 3.1. L'amplitude de cette force est considérée égale à la tension maximale prévue sur un câble, et sa direction est caractérisée par l'angle θ. Cet angle varie avec la position de la plate-forme dans l'espace de travail du robot. L'évaluation numérique de l'effort de compression dans la barre 1 est comparée au calcul analytique de cet effort obtenu par la projection de la tension sur l'axe de la barre. Par ailleurs, l'évaluation numérique de l'état de compression dans les 3 autres barres est comparée à 0, la valeur issue du modèle analytique.

Les résultats de simulation (cf. Figure 3.2) montrent que l'erreur E entre l'effort de compression dans la barre 1 déterminé analytiquement et celui évalué par la simulation est beaucoup plut

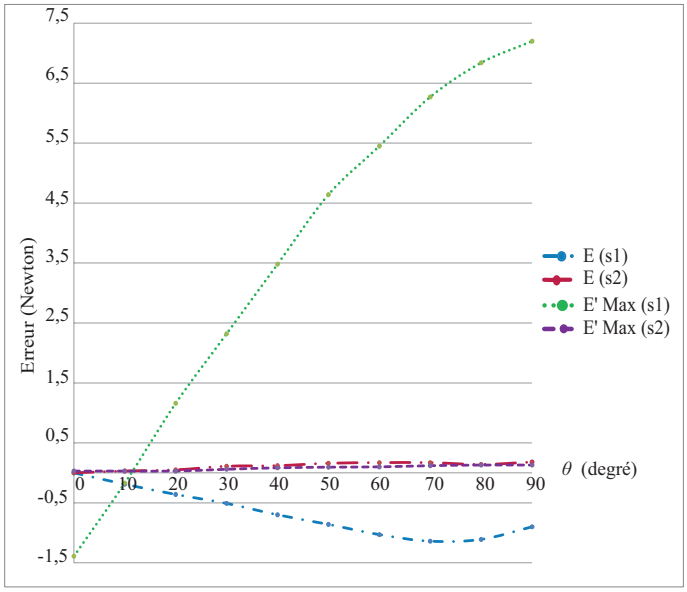

FIGURE 3.2 – Erreurs d'estimation des forces de compression dans les barres pour les deux structure en treillis.

petite pour la structure (s2) que pour la structure (s1). Cette erreur est due en fait à la conception des liaisons glissières. Comme ces liaisons sont réalisées par des liaisons compliantes, leur comportement cinématique est différent de celles parfaites : le découplage dans la structure n'est pas parfait et introduit des erreurs d'estimation de l'effort de compression. La deuxième structure est moins sensible au défaut de la liaison compliante puisque chaque barre du treillis est connectée à une seule liaison glissière, contrairement à la première structure. L'erreur maximale $E^{'}$ rencontrée dans les barres 2, 3 et 4 de le structure (s2) est aussi petite comparée à celle obtenue pour la structure (s1). La deuxième cinématique du treillis (Figure 3.1 (s2)) est donc retenue.

3.1.2 Évaluation de la tension des câbles

Dans le chapitre 2, l'architecture carrée avec 4 câbles non croisés a été sélectionnée. Cette architecture plus la structure en treillis retenue forment l'architecture du robot MRGuide, représentée dans la Figure 3.3. L'évaluation de la tension des câbles sera basée sur la mesure de déplacement dans les barres, comme précisé au chapitre 2.

Principe

Lorsque le câble i, attaché à la barre i au point S (cf. Figure 3.3) est soumis à une tension τ, la barre i est la seule barre à être dans un état de compression. L'effort de compression peut être estimé à partir d'une mesure de déplacement dans la barre. Ce déplacement est

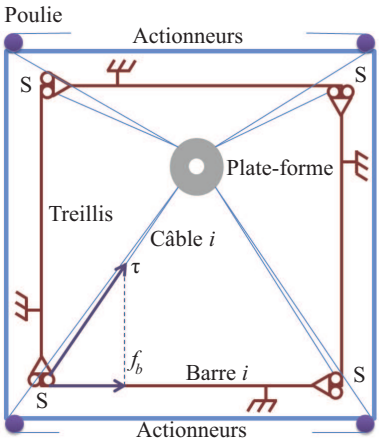

FIGURE 3.3 – Architecture du MRGuide.

néanmoins de faible amplitude étant donnée la longueur limitée de la barre et les modules d'élasticité des matériaux envisagés. Une solution pour augmenter le déplacement dans la barre est de diminuer sa section. Cette variation est limitée car un flambage de la barre risque de se produire. Pour palier le problème, nous proposons donc d'intégrer dans la structure un mécanisme amplificateur, comme le montre la Figure 3.4, à gauche. Ce mécanisme, soumis à l'effort de compression, est basé sur une structure compliante et permet de transformer l'effort de compression dans la barre en un déplacement d'amplitude suffisante pour être mesuré.

Capteurs et matériaux

Le déplacement de la barre est mesuré à l'aide d'un capteur à fibres optiques en réflexion intégré dans la structure treillis. Deux têtes de capteur FU-38 et FU-38V de la marque Keyence ont été comparées. Le capteur FU-38 a été finalement retenu car il offre une plage de variation plus grande avec une meilleure capacité de saturation [Esteveny 2010]. La tête du capteur (cf.

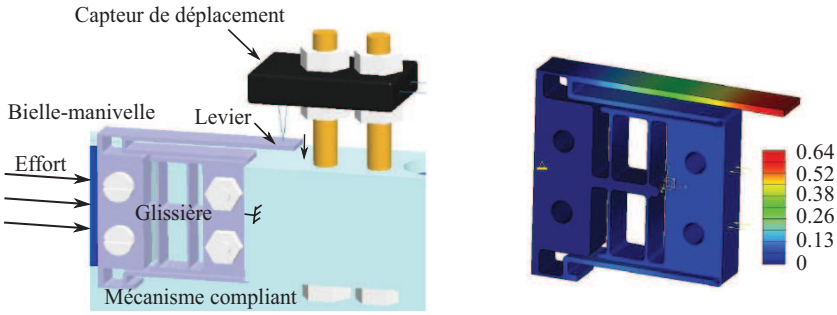

FIGURE 3.4 – À gauche, mécanisme compliant en Cu-Be avec le capteur de déplacement. À droite, amplitude de déplacement (mm) pour un effort de 60 N.

Figure 3.5, à gauche) est compacte (12×19×4 mm^3), et permet de mesurer des déplacements sur une plage de 0.5 mm. L'amplificateur associé est de type Keyence FS-N11 MN (cf. Figure 3.5, à droite).

FIGURE 3.5 – À gauche, tête du capteur. À droite, amplificateur.

Le choix du matériau pour la structure compliante est basé sur des critères introduits par Howell dans [Howell 2001]. Le mécanisme doit posséder un domaine de déformation élastique très grand, tout en limitant le fluage dans le temps et la relaxation sous contrainte. Le domaine de déformation élastique est caractérisé par le rapport entre la limite d'élasticité σ_e et le module de Young E. En dépit d'une meilleure performance des plastiques vis-à-vis la compatibilité avec l'IRM, leur fluage dans le temps est important. Le titane et le Cuivre-Béryllium (Cu-Be) ont également un rapport $\frac{\sigma_e}{E}$ important avec un fluage quasi-inexistant. Ils sont également compatibles avec l'IRM. La susceptibilité magnétique, qui représente la capacité d'un matériau à s'aimanter sous l'action d'un champ magnétique, est beaucoup plus faible pour le Cu-Be que pour le titane. Par conséquent, le Cu-Be a été finalement choisi pour réaliser le mécanisme compliant. Dans le restant de la structure treillis, du plastique peut être utilisé afin d'assurer une meilleure compatibilité avec le scanner.

Implémentation

La conception de la structure compliante a été réalisée en considérant les caractéristiques du capteur à fibres optiques retenu. La valeur maximale de déplacement, égale à 0.5 mm, doit être obtenue pour un effort maximal de compression dans la barre, choisi égal à 60 N. Cette valeur correspond en effet à la tension maximale appliquée par un câble lorsque la direction de celui-ci est presque parallèle à la barre. Ce cas de figure peut se présenter lorsque la plate-forme est au bord de l'espace de travail.

Le mécanisme compliant est basé sur une architecture plane pour simplifier sa fabrication. Il est composé d'une glissière directement soumise à l'effort de compression et d'un mécanisme bielle-manivelle qui transforme le déplacement de la glissière en une rotation du levier, situé sur la face supérieure de la structure compliante, comme le montre la Figure 3.4, à gauche. Le volume de la structure compliante est de 4×20×25 mm^3. Son comportement tel que simulé par la méthode des éléments finis sous Pro-E, est illustré en Figure 3.4, à droite. Un effort de

compression de 60 N induit un déplacement de l'extrémité de la lame de 0.64 mm. La tête du capteur est située à 5 mm de la lame de sorte à ce que l'étendue de mesure du capteur soit bien exploitée. Le rapport d'amplification entre le déplacement de la glissière et le déplacement de l'extrémité de la lame est de l'ordre de 10.

Évaluation expérimentale

Un banc d'essai (cf. Figure 3.6) a été réalisé pour évaluer la précision de la mesure de la tension des câbles. Il est composé de l'une des 4 barres de la structure en treillis, du mécanisme amplificateur et du capteur optique. Il représente par ailleurs le quart de la structure globale du robot puisque les barres du treillis sont identiques et aussi découplées les unes des autres. Un câble est attaché au coin de la structure (point S) d'un côté, et à un capteur d'effort de l'autre. Ce capteur est monté sur une liaison glissière afin de pouvoir imposer les tensions nécessaires au câble.

Dans un premier temps, nous avons étalonné le capteur de tension en appliquant des efforts de compression entre [0, 50 N] dans la direction de la barre (cf. Figure 3.6). Ces efforts sont mesurés par le capteur d'effort placé dans l'axe de la barre. Ensuite, pour différentes orientations du câble, notée P1...P5 dans la Figure 3.6, nous avons fait varier la tension du câble dans le même intervalle. La tension du câble mesurée par le capteur d'effort est comparée à celle estimée à partir du capteur optique dans la Figure 3.7. Les erreurs d'estimation de la tension du câble restent limitées : elles sont comprises entre -4 N et 2 N. Une analyse approfondie des résultats expérimentaux montre que l'incertitude introduite par la mesure de l'orientation du câble effectuée manuellement est significative. La mesure de l'angle est connue avec une précision de $\pm$ 2°. Pour chaque orientation du câble, une enveloppe d'incertitude est déterminée en prenant en compte l'incertitude sur l'angle. Pour l'angle P1= 11°, l'enveloppe d'incertitude est tracée en considérant les angles 9°et 13°(cf. Figure 3.7). À l'intérieur de ces enveloppes, l'égalité entre la tension mesurée et la tension estimée est possible. Une meilleure connaissance de l'angle pourrait améliorer les résultats d'estimation. Dans le cas de notre

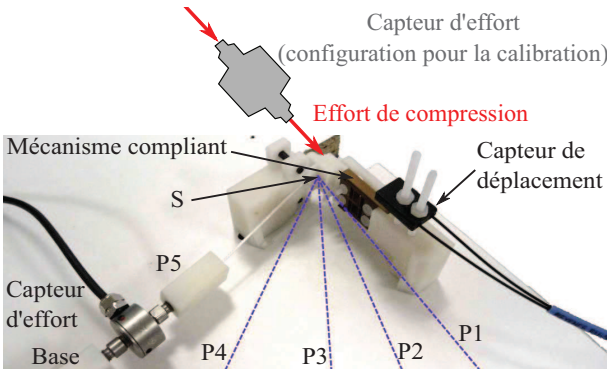

FIGURE 3.6 – Banc d'essai sur le quart de la structure.

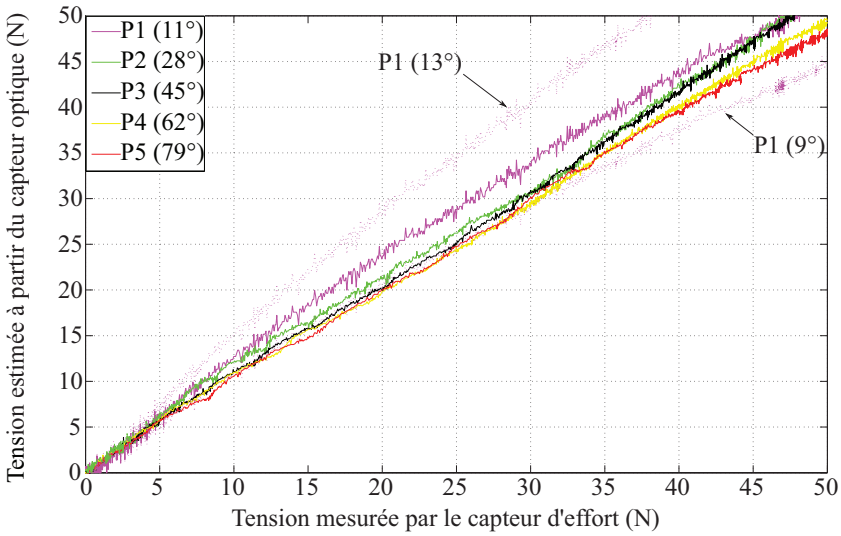

FIGURE 3.7 – Évaluation de la tension dans le câble.

application, l'orientation des câbles sera estimée à partir de la position de la plate-forme. L'erreur maximale absolue de l'orientation du câble, évaluée théoriquement à partir de l'erreur maximale de la position de la plate-forme, est alors égale à ± 0.05˚.

3.2 Prototype et tests d'évaluation

3.2.1 Description du système

La CAO du manipulateur MRGuide est détaillée dans la Figure 3.8. On peut identifier la grille de positionnement, le bâti, la structure en treillis et les mécanismes compliants. La grille de positionnement, de 3 mm d'épaisseur, est composée d'un ensemble de trous espacés de 5 mm dont la forme conique permet l'insertion des aiguilles et leur rotation. Le treillis forme la structure intérieure du bâti avec une partie fixe et une partie mobile. Les câbles arrivent des actionneurs à la plate-forme via des œillets et s'attachent au niveau de la structure. La distance entre les points d'attache, déterminée dans le chapitre 2 (cf. Tableau 2.2) est égale à 69 mm.

Le guide de l'aiguille (cf. Figure 3.9, à gauche), d'une forme conique, permet l'insertion des aiguilles et leur orientation. Sa base permet la réalisation de la liaison plane entre le guide et la grille de positionnement. La hauteur du guide, égale à h = 13 mm, a été choisie de sorte à ce que l'insertion des aiguilles avec et sans orientation puisse se faire sur le même espace de travail de diamètre 50 mm, comme le montre la Figure 3.9, à droite.

Le bâti et la structure en treillis sont réalisés en un seul élément par prototypage rapide avec un matériau de type polyamide chargé de fibre de verre, pour assurer la compatibilité avec l'IRM.

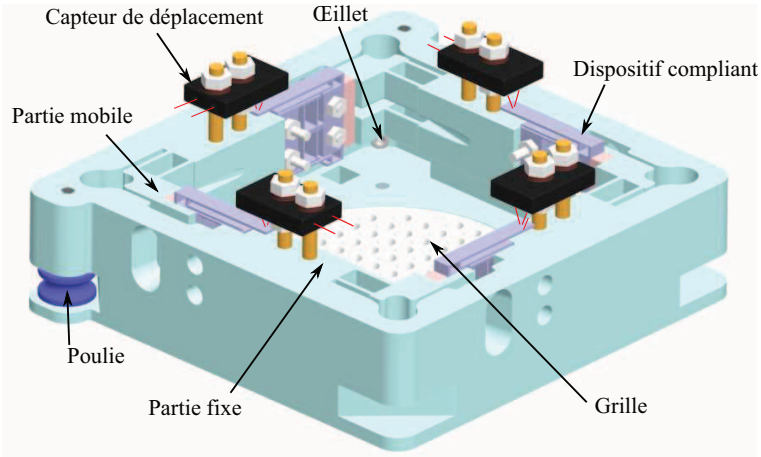

FIGURE 3.8 – CAO du robot MRGuide.

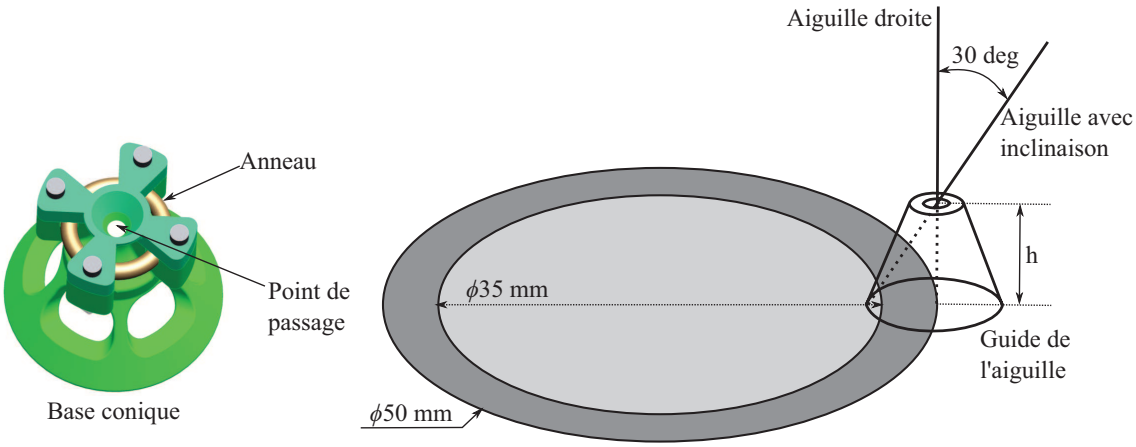

FIGURE 3.9 – À gauche, CAO du guide de l'aiguille. À droite, mise en évidence du choix de la hauteur du guide.

La grille de positionnement, qui est en contact permanent avec la plate-forme, est usinée en Delrin afin d'obtenir un coefficient de frottement faible au niveau de la surface de contact. Les dimensions finales du MRGuide sont $100 \times 100 \times 40$ mm^3. Le poids du manipulateur associé à la grille est d'environ 120 g. La plate-forme est fabriquée aussi en prototypage rapide par frittage de poudre d'aluminium. Son poids n'excède pas les 15 g.

3.2.2 Câbles et actionnement

Les câbles retenus sont en fibres de polyéthylène Dyneema®SK75. Ces câbles sont transparents dans l'IRM et présentent une résistance élevée à la rupture ainsi qu'une rigidité importante. Leur module d'Young est de l'ordre de 107 GPa ; garantissant ainsi un allongement

très faible sous charge. Un câble de diamètre 0.14 mm peut supporter sans rupture la tension maximale choisie. Nous avons choisi un câble de diamètre 0.75 mm afin de disposer d'un coefficient de sécurité suffisant. Entre l'assistant robotique et les actionneurs situés à l'extérieur de la salle IRM, l'élasticité des câbles doit être minimisée afin de simplifier la commande. Des câbles plus gros, avec un diamètre de 2 mm sont alors sélectionnés. Avec ces câbles, l'allongement est de seulement 1 mm sur une longueur de 6 m avec une charge de 60 N.

Comme l'actionnement est déporté à l'extérieur de la salle IRM, des moteurs conventionnels peuvent être utilisés sans interférer avec le champ magnétique intense du scanner ou déformer les images. Des servomoteurs à courant continu sans réducteur ont été sélectionnés afin de limiter le jeu mécanique. Des poulies, montées sur l'arbre des moteurs, sont utilisées pour enrouler les câbles. Le diamètre de ces poulies conditionne le choix des moteurs. Minimiser ce diamètre va permettre de diminuer le couple moteur nécessaire. Cependant, les câbles de diamètre 2 mm doivent s'enrouler correctement sur ces poulies. Nous avons donc choisi un diamètre de 18 mm. Avec ce diamètre, le couple moteur maximal nécessaire pour appliquer une tension maximale de 60 N est de 0.54 Nm. Les servomoteurs retenus sont de la marque Parvex RS320H. Ces moteurs sont équipés de codeurs incrémentaux avec une résolution de 8000 points par tour.

3.2.3 Tests de compatibilité IRM

Un des aspects fondamentaux pour la réussite de l'intégration du dispositif dans le scanner est sa compatibilité avec l'imageur. Cete dernière a été évaluée en deux étapes : la compatibilité de la structure et de la plate-forme du manipulateur est évaluée dans un premier temps (cf. Figure 3.10), avant de considérer le mécanisme compliant conçu pour l'évaluation de la tension.

Le scanner MAGNETOM Espree 1.5 T de Siemens est utilisé et la configuration habituelle pour visualiser la prostate est mise en place : l'antenne corps de l'IRM, utilisée pour explorer des zones anatomiques ciblées, est positionnée au-dessus du dispositif robotique, en choisissant une séquence BLADE. Un fantôme est placé à proximité du dispositif afin d'évaluer son influence sur des images de référence.

L'objectif du premier test (cf. Figure 3.11, 1a) est de vérifier la compatibilité de la structure conjointement avec la plate-forme. Une aiguille de cryoablation est insérée dans le fantôme, que l'on peut repérer facilement dans l'image. Le dispositif est entièrement transparent et n'introduit aucun artefact dans l'image, si l'on compare l'image (1a) avec l'image (1b) où le dispositif n'est pas dans le scanner. Dans le deuxième test (2a), la structure du manipulateur uniquement est évaluée. L'image montre une coupe transversale à travers le mécanisme et le fantôme. Le dispositif est visible dans l'image mais ne produit aucune distorsion de l'image, en comparaison avec (2b) où la structure est manquante. Dans le dernier test, la compatibilité du mécanisme compliant est vérifiée. Un élément radio-opaque (3a) est placé au-dessus la structure compliante en vue de la repérer. Les images sont obtenues dans un plan sagittal.

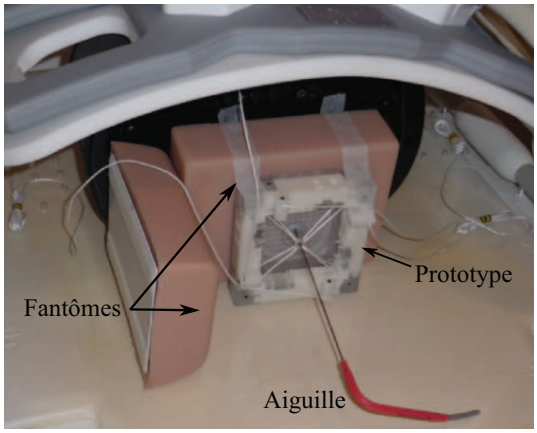

FIGURE 3.10 – Évaluation de la compatibilité avec le scanner : la structure du MRGuide est positionnée à l'intérieur de l'antenne corps de l'IRM entre deux fantômes.

Encore une fois, aucun artefact n'est observé dans les images.

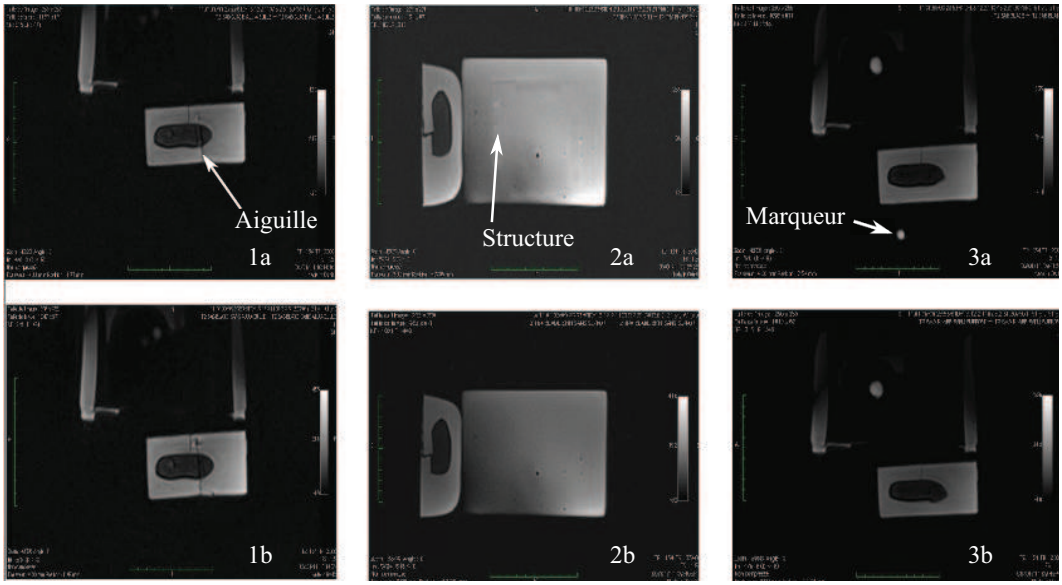

FIGURE 3.11 – Tests de compatibilité IRM.

3.3 Validation de l'instrumentation sur la structure du MRGuide

Dans la section 3.1, le principe de l'évaluation de la tension d'un câble à partir d'une mesure optique de déplacement a été validé. Pour valider ce principe sur la structure complète du treillis et vérifier le découplage des mesures, un banc d'essai illustré dans la Figure 3.12 est considéré. Ce montage est composé du robot MRGuide, fixé horizontalement sur une table,

un actionneur et un câble les liant. Ce câble est attaché au nœud de la structure en treillis (point S) d'un côté, passe à travers le capteur d'effort en faisant un demi-tour avant d'être enroulé sur la poulie d'actionnement située à proximité du robot.

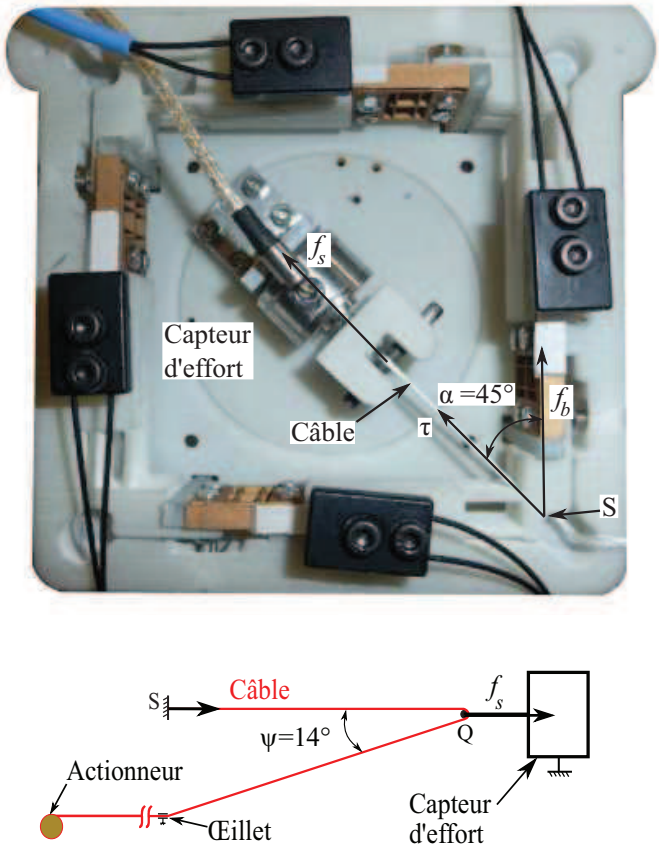

FIGURE 3.12 – Étalonnage du capteur optique. En haut, vue de dessus du robot MRGuide. En bas, schématisation du banc d'essai.

D'après le modèle de la structure en treillis, la tension τ dans le câble au niveau de la structure et la force f_b de compression dans la barre sont directement liées :

$$f_b = \tau \cos \alpha \tag{3.1}$$

avec α l'angle entre le câble et la structure, comme le montre la Figure 3.12, en haut. Dans la zone de déformation élastique du mécanisme compliant, la relation entre l'effort de compression f_b et le déplacement de la lame Δl peut être approximée par :

$$f_b = k\Delta l \tag{3.2}$$

où k est la raideur du mécanisme compliant. À partir des deux equations (3.1) et (3.2), la

relation entre la raideur et la tension dans le câble s'écrit :

$$k = \Delta l^{-1} \tau \cos\alpha \tag{3.3}$$

Par ailleurs, l'équilibre au point Q, illustré dans la Figure 3.12, nous permet d'établir une relation entre la tension τ et la force f_s mesurée par le capteur d'effort :

$$\tau = \frac{f_s}{1 + \cos\psi} \tag{3.4}$$

Finalement, le modèle de la raideur du mécanisme compliant est exprimé par :

$$k = \Delta l^{-1} f_s \frac{\cos\alpha}{1 + \cos\psi} \quad \text{soit} \quad f_b = f_s \frac{\cos\alpha}{1 + \cos\psi} \tag{3.5}$$

La procédure d'étalonnage est effectuée en quasi-statique en appliquant des tensions dans le câble dans un intervalle [0, 30] N au niveau de l'actionneur, comme le montre la Figure 3.13. Les consignes de courant envoyées à l'actionneur pour obtenir ces tensions sont entre [0, 2] A avec des paliers à [0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2] A. La tension dans le câble au niveau de l'actionneur est estimée par le rapport entre le couple moteur appliqué, image du courant, et le rayon de la poulie d'actionnement. On peut constater un léger retard dans la traction à cause des frottements. La Figure 3.14 illustre le déplacement de la lame du module déformable. Ce déplacement représente l'image de la tension appliquée par le câble au niveau de la structure (point S). Aucun déplacement n'est par ailleurs observé sur les 3 autres capteurs optiques. L'effort de compression dans la barre sollicitée n'a pas été transmis dans les autres barres. Le modèle de la structure en treillis apparait bel et bien découplé.

Afin de coller au mieux aux résultats expérimentaux, nous avons établi un modèle linéaire de la forme $f_b = k\Delta l + f_{b_0}$. L'effort de compression f_b est calculé à partir de la mesure d'effort f_s en utilisant la relation (3.5). Pour chaque palier de couple, on détermine une moyenne sur les mesures de déplacement et une moyenne sur les mesures d'effort de compression dans la barre, comme le montre la Figure 3.15. Ces données sont ensuite utilisées pour identifier les paramètres du modèle proposé en utilisant la méthode des moindres carrées linéaires. Le modèle identifié présente un fitting de 99.5 %. La raideur du mécanisme compliant est égale à $k = 205\,\mathrm{Nmm}^{-1}$ et l'offset de l'effort de compression dans la barre est égale $f_{b_0} = 0.17$ N.

Maintenant que le modèle qui relie les efforts dans la barre au déplacement de la lame est déterminé, il est intéressant de regarder la répétabilité des mesures. Pour cela, nous avons répété le test réalisé pour l'étalonnage 4 fois, comme le montre la Figure 3.16. D'abord, pour chaque test on calcule la moyenne des mesures de déplacement de la lame lorsque le couple moteur est maintenu constant. Ensuite, pour chaque couple on calcule la moyenne et l'écart type des moyennes déterminées auparavant. Enfin, pour chaque valeur de couple on établit la dispersion de mesures. D'après les résultats, la dispersion est maximale lorsque la plus petite valeur des courants (0.2 A) est appliquée. Elle est égale à 5 % et elle diminue lorsque le courant

augmente. La tension dans le câble au niveau de la structure, évaluée par le capteur optique lorsque le courant de 0.2 A est appliqué, est d'environ 3 N. La dispersion de mesure évaluée est inférieure à 3 %. Nous considérons ce résultat satisfaisant pour l'application considérée.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une instrumentation originale afin d'estimer la tension des câbles. L'instrumentation est basée sur l'utilisation d'une structure en treillis, de mécanismes amplificateurs et des capteurs de déplacement à technologie optique. Dans un premier temps, nous avons analysé, en utilisant la méthode des éléments finis, deux schémas cinématiques de la structure en treillis afin de choisir la plus appropriée. La structure qui présente un meilleur découplage dans le système et qui introduit la plus petite erreur dans l'estimation de la tension des câbles a été retenue. Suite à ce choix, nous avons effectué une évaluation expérimentale sur un banc d'essai dédié pour valider cette stratégie de mesure. L'estimation de la tension du câble par le capteur optique est comparée avec la mesure de celle-ci par le capteur d'effort. D'après les résultats obtenus, la faisabilité de cette stratégie est vérifiée.

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé un prototype afin de valider la preuve de concept quand au système de positionnement. L'évaluation du prototype en terme de compatibilité a été accomplie avec succès : le dispositif robotique est entièrement transparent et n'introduit aucun artefact dans l'image. Nous avons ensuite proposé un montage permettant l'étalonnage des capteurs optiques, montés sur la structure du robot. Le découplage dans le système a été d'abord démontré. Ensuite, un modèle reliant la mesure de déplacement et la tension des câbles a été déterminé avec un très bon fitting aux résultats expérimentaux. Finalement, la répétabilité des mesures a été évaluée. La prochaine étape est donc maintenant l'évaluation de la commande du dispositif en utilisant les capteurs développés. Cette étude fait l'objet du dernier chapitre.

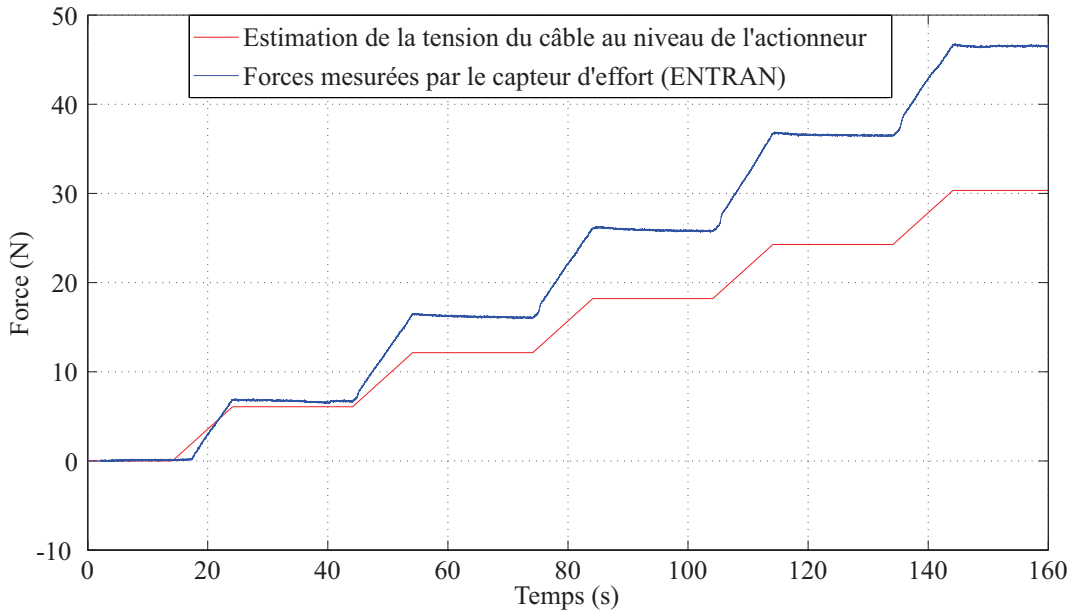

FIGURE 3.13 – Mesures d'effort en utilisant le capteur d'effort ENTRAN utilisé pour l'étalonnage du capteur optique.

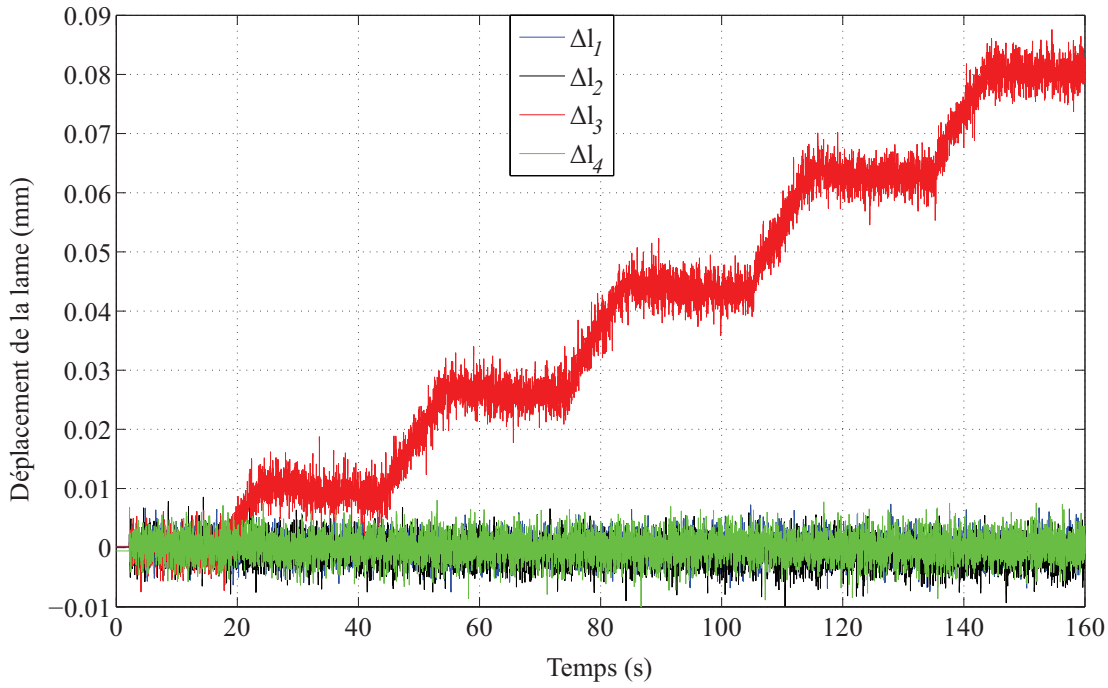

FIGURE 3.14 – Déplacement de la lame mesuré par le capteur optique.

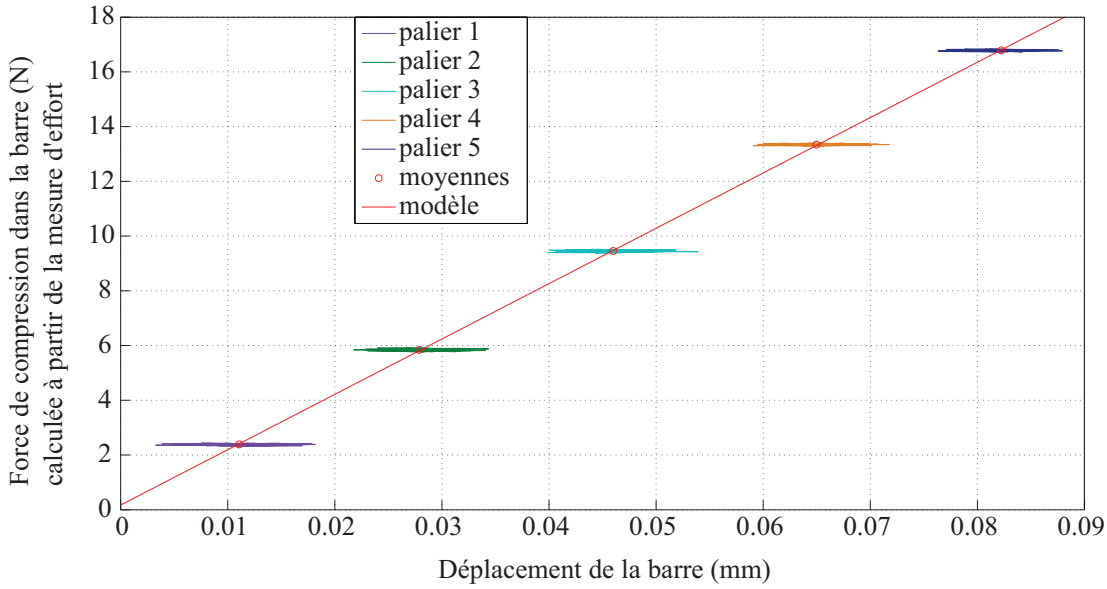

FIGURE 3.15 – Modèle expérimental entre l'effort de compression dans la barre et le déplacement de la lame.

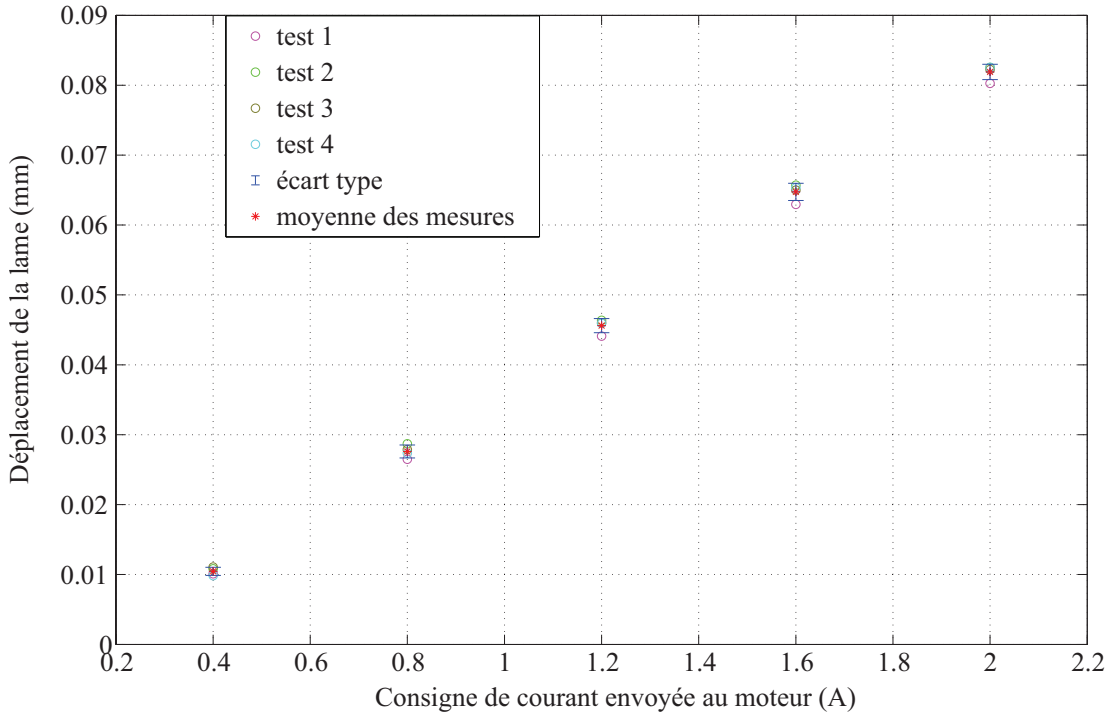

FIGURE 3.16 – Dispersion de mesures du capteur optique.

4 Commande et expérimentations

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la commande du robot MRGuide. Tout d'abord, un état de l'art sur les stratégies de commande est exposé. Ensuite, à partir des stratégies existantes, nous proposons d'évaluer expérimentalement un schéma de commande conventionnel pour réaliser l'asservissement de la position de la plate-forme du MRGuide. Pour cela, les algorithmes spécifiques à la commande sont expliqués. Enfin, une nouvelle stratégie de commande basée sur l'utilisation des capteurs optiques développés pour la mesure de tension est évaluée.

4.1 Commande des robots à câbles : état de l'art

4.1.1 Stratégies de commande

Le positionnement des manipulateurs à câbles peut être effectué par deux approches différentes. La première approche consiste à piloter la longueur des câbles pour faire déplacer la plate-forme. La longueur des câbles désirée est obtenue à partir de la pose désirée de la plate-forme en utilisant le modèle géométrique inverse (MGI) du robot. Pour asservir ces longueurs, Kawamura et al. [Kawamura 1995] proposent un correcteur proportionnel dérivé en y ajoutant un terme constant arbitraire, qui permet d'assurer une certaine rigidité dans le système. Les auteurs prouvent que la stabilité du système asservi est garantie au sens de Lyapunov. Fang et al. [Fang 2004] proposent quant à eux d'effectuer la commande par découplage non linéaire. La commande est réalisée en utilisant un correcteur proportionnel dérivé avec l'ajout d'un terme non linéaire de feedforward. Ce dernier est calculé d'après le modèle dynamique inverse du robot.

La deuxième approche consiste à asservir la pose de la plate-forme directement dans l'espace opérationnel. Le déplacement de plate-forme est effectué en modifiant la tension dans les câbles. La pose de la plate-forme est soit mesurée par une caméra ou par des capteurs de position placés sur la plate-forme, soit calculée en utilisant le modèle géométrique direct (MGD). L'inconvénient est que le calcul de ce dernier est en règle générale compliqué dans le cas des

Publication	Robot	Stratégie de commande	Capteurs	Expérience
[Kawamura 1995]	FALCON (6 ddl)	PD	Codeurs	Oui
[Gallina 2001]	Plan (3 ddl)	Découplage non linéaire + feedforward		Non
[Fang 2004]	SEGESTA (6 ddl)	Découplage non linéaire + feedforward	Codeurs	Oui
[Kino 2007]	Plan (2 ddl)	Adaptative PD	Caméra + codeurs	Oui

Tableau 4.1 – Stratégies de commande des robots à câbles : état de l'art.

robots parallèles, qu'ils soient à segments rigides ou à câbles. Gallina et al. [Gallina 2001] réalisent un suivi de trajectoire avec une loi de commande basée sur un découplage non linéaire. L'accélération de référence est ajoutée à la commande comme terme de feedforward afin d'améliorer le suivi. Kino et al. [Kino 1999] étudient une solution basée sur un asservissement visuel de la position de la plate-forme en utilisant des capteurs extéroceptifs. Plus tard, Kino et al. [Kino 2007] étendent cette étude dans le cas où la matrice jacobienne du robot contient des incertitudes. Ils proposent alors de rajouter la mesure de la longueur des câbles, afin de compenser les erreurs dues à la force interne dans le système, qui dégradent les performances de positionnement. La loi de commande utilisée est basée sur un correcteur proportionnel dérivé adaptatif. Le tableau 4.1 résume les stratégies mentionnées et précise les capteurs employés.

4.1.2 Algorithmes de gestion coordonnée des tensions dans les câbles

Quelle que soit la stratégie de commande utilisée, il faut que les tensions dans les câbles restent toujours admissibles. Pour cela, il faut résoudre le système d'équations linéaires (2.1) sous la contrainte que les tensions dans les câbles sont bornées. La résolution d'un tel système est l'objet des algorithmes de gestion coordonnée (AGC) des tensions dans les câbles. On trouve dans la littérature plusieurs études traitant ce problème, particulièrement pour les mécanismes pleinement contraints. Dans le cas où le nombre de câbles est égal à $n+1$, avec n le degré de liberté du robot, le calcul de la solution du système d'équations est relativement simple. Le cas où le nombre de câbles est supérieur à $n+1$ est en revanche plus délicat.

Une des approches proposées pour résoudre ce système d'équations est basée sur la programmation linéaire. Cette approche a été utilisée dans [Ming 1994, Fang 2004, Pham 2005] pour déterminer une solution optimale en minimisant un critère linéaire. Il s'agit par exemple de minimiser la norme $\|\,.\,\|_\infty$ donnée par la plus grande composante du vecteur $\boldsymbol{\tau}$ des tensions, ou bien de minimiser la norme $\|\,.\,\|_1$ qui correspond à la somme des éléments de ce vecteur. Verhoeven [Verhoeven 2004] a démontré que les solutions obtenues lors de telles optimisa-

tions sont parfois discontinues et ce, même si la plate-forme se trouve dans des positions non singulières [Verhoeven 2004, page 64]. Ceci conduit à des changements brutaux de tensions dans les câbles, résultant de changements de position de la plate-forme infiniment petits. Dans le cas où le critère à minimiser est une norme $\|.\|_p$ avec $p \neq 1$ et $p \neq \infty$, les solutions optimales calculées sont continues et uniques, sauf dans des positions singulières.

La programmation quadratique a été aussi considérée pour résoudre ce problème. L'algorithme proposé par Verhoeven [Verhoeven 2004] consiste à minimiser la norme euclidienne $\|\boldsymbol{\tau}\|_2$ du vecteur des tensions dans les câbles. Dans une même approche, Lafourcade [Lafourcade 2004] propose de minimiser plutôt la norme de $\|\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_{opt}\|_2$ où $\boldsymbol{\tau}_{opt}$ est prédéfini. Dans le cas où la solution optimale obtenue n'est pas admissible, l'auteur propose un algorithme de saturation de contrainte. Il consiste à saturer les tensions correspondant à une contrainte non vérifiée, puis effectuer de nouveau l'optimisation, de manière itérative jusqu'à obtention du résultat.

Une approche non itérative, développée par [Mikelsons 2008], a par ailleurs été utilisée pour résoudre le problème de gestion coordonnée des tensions dans les câbles. Cette approche consiste à calculer de manière analytique l'ensemble des solutions admissibles au système d'équations linéaires sous contraintes. Parmi les solutions déterminées, une seule est retenue. Cette dernière représente le centre de gravité de l'ensemble des solutions admissibles. Les auteurs ont démontré que cette solution est continue le long des trajectoires se trouvant à l'intérieur de l'espace des poses polyvalentes.

4.2 Modélisation du MRGuide

Afin de réaliser la commande de notre système, il est nécessaire de disposer des modèles du robot. Dans ce travail, nous avons utilisé des modèles analytiques, issus d'une géométrie légèrement simplifiée du robot. Les modèles tenant compte de la géométrie exacte du MRGuide sont eux présentés dans l'annexe A. Les hypothèses simplificatrices sont les suivantes. La plate-forme est considérée comme un point matériel. La structure du robot est supposée plane comme représenté sur la Figure 4.1. Avec cette géométrie, il est possible de déterminer une relation analytique entre la position de la plate-forme et la longueur des câbles.

Soit $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix}^T$ la position de cette plate-forme exprimée dans un repère fixe $\mathbb{R}_0 = \left(O, \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0\right)$ situé au centre de la structure. Les points d'attache et les points de passage des câbles, notés A_j, $j \in [1,4]$, sont situés sur un cercle de rayon R, aux coins de la structure carrée. Pour simplifier, on suppose les points d'attache et les points de passage superposés. Soient ${}^0\mathbf{a}_j$, les vecteurs définissant les coordonnées des points A_j dans le repère $\mathbb{R}_0$:

$$ {}^0\mathbf{a}_j = \begin{pmatrix} \mathrm{R}\cos\alpha_j \\ \mathrm{R}\sin\alpha_j \end{pmatrix} \tag{4.1} $$

avec $\alpha_j = \frac{(-2j+7)\pi}{4}$.

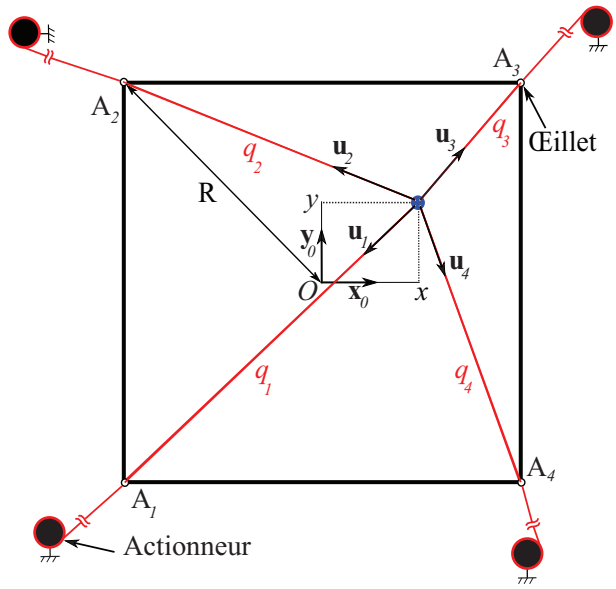

FIGURE 4.1 – Structure simplifiée du MRGuide.

4.2.1 Modèle géométrique inverse

Le MGI permet d'obtenir la longueur des câbles à partir de la position de la plate-forme. Soit $\mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_1 & q_2 & q_3 & q_4 \end{pmatrix}^T$ le vecteur de configuration qui contient les longueurs q_j des câbles entre les points de passage A_j et la plate-forme, multipliées par deux à cause de l'aller-retour :

$$q_j = 2\|\mathbf{x} - {}^0\mathbf{a}_j\| \tag{4.2}$$

Le MGI est alors donné par :

$$\begin{cases} q_1 = 2\sqrt{(x - \mathrm{R}\cos\alpha_1)^2 + \left(y - \mathrm{R}\sin\alpha_1\right)^2} & (a) \\ q_2 = 2\sqrt{(x - \mathrm{R}\cos\alpha_2)^2 + \left(y - \mathrm{R}\sin\alpha_2\right)^2} & (b) \\ q_3 = 2\sqrt{(x - \mathrm{R}\cos\alpha_3)^2 + \left(y - \mathrm{R}\sin\alpha_3\right)^2} & (c) \\ q_4 = 2\sqrt{(x - \mathrm{R}\cos\alpha_4)^2 + \left(y - \mathrm{R}\sin\alpha_4\right)^2} & (d) \end{cases} \tag{4.3}$$

4.2.2 Modèle géométrique direct

Le MGD exprime la position de la plate-forme en fonction de la longueur des câbles. Pour l'exprimer, il faut résoudre le système d'équations (4.3), en soustrayant (a) et (b) d'une part et

(a) et (d) d'autre part :

$$\begin{cases} x = \dfrac{q_1^2 - q_4^2}{8\sqrt{2}\mathrm{R}} \\ y = \dfrac{q_1^2 - q_2^2}{8\sqrt{2}\mathrm{R}} \end{cases} \tag{4.4}$$

Connaissant l'angle de rotation θ_{mj} de chaque moteur et le rayon R_p de la poulie d'actionnement, la longueur q_j est évaluée grâce à l'équation suivante :

$$q_j = q_{j0} + \mathrm{R}_p \theta_{mj} \tag{4.5}$$

avec $q_{j0} = 2\mathrm{R}$ la longueur du câble j lorsque la plate-forme est à l'origine O du repère $\mathbb{R}_0$, où est effectuée l'étalonnage.

4.2.3 Modèle cinématique inverse

Le modèle cinématique inverse permet d'établir la relation entre la vitesse $\dot{\mathbf{q}}$ de déroulement des câbles et la vitesse $\dot{\mathbf{x}}$ de la plate-forme :

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{x}} \tag{4.6}$$

où $\mathbf{J}$ est la matrice jacobienne (puisque il s'agit d'un robot parallèle) de dimension (4×2) :

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial q_1}{\partial x} & \frac{\partial q_1}{\partial y} \\ \cdots & \cdots \\ \frac{\partial q_4}{\partial x} & \frac{\partial q_4}{\partial y} \end{pmatrix} \tag{4.7}$$

soit d'après (4.3) :

$$\mathbf{J} = 4 \begin{pmatrix} \frac{x - \mathrm{R}\cos\alpha_1}{q_1} & \frac{y - \mathrm{R}\sin\alpha_1}{q_1} \\ \cdots & \cdots \\ \frac{x - \mathrm{R}\cos\alpha_4}{q_4} & \frac{y - \mathrm{R}\sin\alpha_4}{q_4} \end{pmatrix} \tag{4.8}$$

On remarque que $\mathbf{J}$ s'écrit encore :

$$\mathbf{J} = -2 \begin{pmatrix} \mathbf{u}_1^T \\ \cdots \\ \mathbf{u}_4^T \end{pmatrix} \tag{4.9}$$

où $\mathbf{u}_j$ désigne le vecteur unitaire dans la direction du câble j. On retrouve la relation, exprimée dans [Roberts 1998] entre la matrice jacobienne $\mathbf{J}$ et la matrice des torseurs unitaires $\mathbf{W}$:

$$\mathbf{J} = -\mathbf{W}^T \tag{4.10}$$

qui tient compte de l'aller-retour du câble dans la matrice **W**, d'où la multiplication des vecteurs unitaires par 2.

4.3 Principe de l'asservissement du robot MRGuide

Le choix de la stratégie de commande dépend de la connaissance ou non des modèles du robot. Comme les modèles géométriques sont analytiques dans le cas de la géométrie simplifiée, l'asservissement de la position de la plate-forme peut être réalisé soit dans l'espace opérationnel, soit dans l'espace des configurations (espace des longueurs des câbles). Dans le cas où la géométrie exacte du robot est considérée, la pose de la plate-forme est définie par deux coordonnées de position et une de rotation. L'expression analytique de la pose en fonction de la longueur des câbles n'est alors pas triviale. Par conséquent, un modèle numérique, détaillé dans l'annexe A, est établi. Étant donnée que seule la position de la plate-forme est spécifiée par la tâche (l'orientation n'ayant pas d'intérêt pratique), il est selon nous plus judicieux de commander la pose de la plate-forme dans l'espace opérationnel. Si un asservissement dans l'espace des longueurs des câbles était désiré, il faudrait définir un profil de rotation de la plate-forme pour pouvoir utiliser le modèle géométrique inverse.

Dans la suite, nous considérons donc l'asservissement de la position de la plate-forme dans l'espace opérationnel, en utilisant les modèles simplifiés. Le schéma de commande en position est conventionnel [Gallina 2001, Lafourcade 2004], tel que représenté à la Figure 4.2. Il utilise un correcteur de position $\mathbf{C_x}$, un algorithme de faisabilité et un algorithme de gestion coordonnée de la tension des câbles. L'erreur, entre la position désirée $\mathbf{x}^d$ de la plate-forme et la position courante $\mathbf{x}$, permet de calculer, via le correcteur de position l'effort $\mathbf{f}^v$ à appliquer à la plate-forme. La faisabilité de cet effort est testée, donnant une nouvelle consigne à l'AGC qui calcule lui les tensions dans les câbles. Celles-ci servent enfin de référence à l'asservissement bas-niveau des actionneurs où R_p correspond au rayon de la poulie d'enroulement.

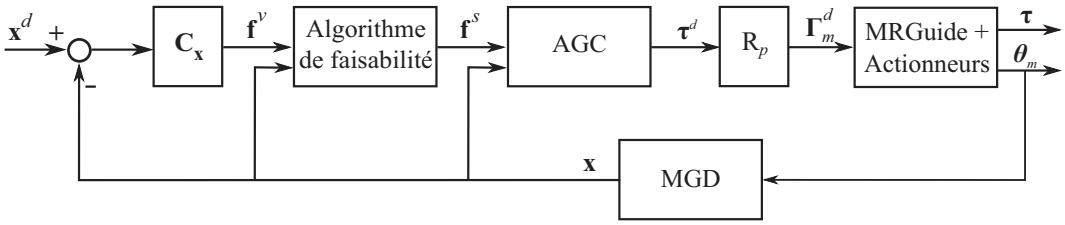

FIGURE 4.2 – Principe de l'asservissement de position du Robot MRGuide.

4.3.1 Algorithme de faisabilité

Pour que l'effort $\mathbf{f}^v$ issu du correcteur soit réalisable à l'aide des tensions admissibles dans les câbles, il faut que celui-ci appartienne à l'ensemble des torseurs disponibles, caractérisé par

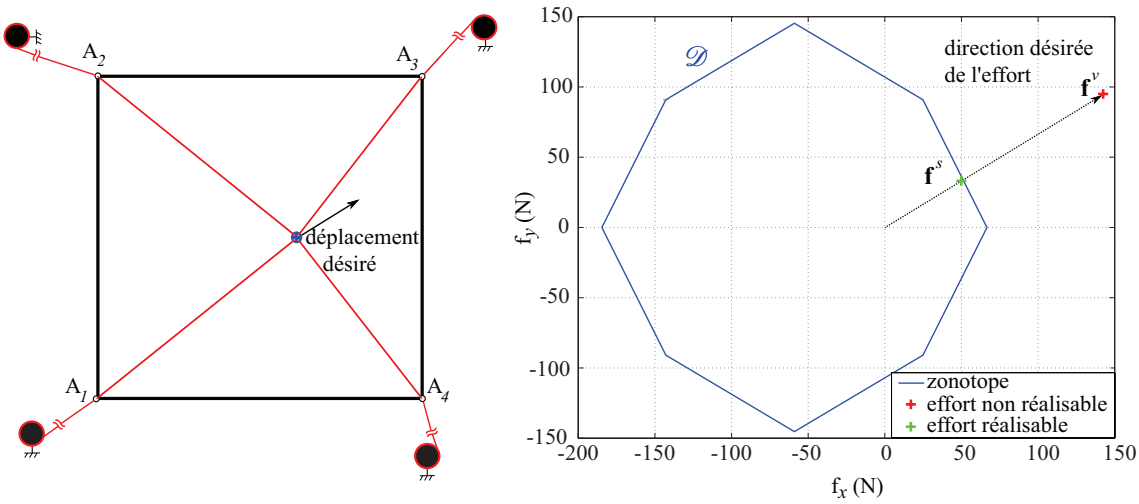

FIGURE 4.3 – Faisabilité d'un torseur.

l'ensemble $\mathscr{D}$ (cf. Figure 4.3). Dans le cas où $\mathbf{f}^v$ est extérieur à $\mathscr{D}$, il est impossible de trouver une combinaison de tensions admissibles dans les câbles permettant de contrebalancer cet effort, et cela quel que soit l'AGC utilisé. Pour palier ce problème, nous proposons d'intégrer dans la chaine d'asservissement un algorithme de faisabilité. Ce dernier est composé d'une procédure de test de faisabilité et d'une routine de saturation (cf. Algorithme 4.1). La procédure de test de faisabilité reprend les éléments développés dans [Bouchard 2008a] en y ajoutant la routine de saturation. Cette routine permet de déterminer un effort $\mathbf{f}^s$, dit de saturation, que les câbles peuvent contrebalancer. Cet effort $\mathbf{f}^s$ doit être en particulier dans la même direction que $\mathbf{f}^v$ afin de ne pas modifier la trajectoire désirée de la plate-forme.

Algorithme 4.1 Algorithme de faisabilité.

1. $[\mathbf{C}, \mathbf{D}_o] = \textbf{Zonotope}(\boldsymbol{\tau}_{min}, \boldsymbol{\tau}_{max}, \mathbf{x})$
2. **if** $\left(\textbf{Feasibility}\left(\mathbf{C}, \mathbf{D}_o, \mathbf{f}^v\right) = 1\right)$
3. $\quad\quad \mathbf{f}^s = \mathbf{f}^v$
4. **else**
5. $\quad\quad \mathbf{f}^s = \textbf{WrenchSaturation}\left(\mathbf{C}, \mathbf{D}_o, \mathbf{f}^v\right)$

Pour calculer $\mathbf{f}^s$, l'algorithme de faisabilité (cf. Algorithme 4.1) reçoit les arguments suivants : l'effort $\mathbf{f}^v$, la pose $\mathbf{x}$ de la plate-forme et les tensions admissibles $\boldsymbol{\tau}_{min}$ et $\boldsymbol{\tau}_{max}$ dans les câbles. D'abord, la procédure **Zonotope** détermine l'ensemble des torseurs disponibles $\mathscr{D}$ que les câbles peuvent générer sur la plate-forme, en calculant les différents vecteurs unitaires $\mathbf{c}_i$ regroupés dans $\mathbf{C}$ et le vecteur des distances $\mathbf{D}_o$ entre l'origine et les hyperplans exprimées par l'équation (2.15). Le test de faisabilité, réalisé par la procédure **Feasibility**, est ensuite effectué en utilisant la relation (2.16). Si $\mathbf{f}^v \in \mathscr{D}$, la procédure **Feasibility** renvoie 1 et l'effort $\mathbf{f}^s$ est maintenu à $\mathbf{f}^v$. Sinon, elle renvoie -1 et l'algorithme de faisabilité fait appel à la routine de

saturation dans **WrenchSaturation**, détaillée dans l'algorithme 4.2.

Algorithme 4.2 Procédure **WrenchSaturation** de l'algorithme 4.1.

1. $\mathscr{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \|\mathbf{f}^v\| \end{bmatrix}$, $\mathbf{d}_{\mathbf{f}^v} = \mathbf{f}^v / \|\mathbf{f}^v\|$
2. **While** (width $(\mathscr{B}_1) > \delta$) **do**
3. $\quad Bisect(\mathscr{B}_1)$
4. $\quad \mathbf{f}^v = \inf(\mathscr{B}_2) * \mathbf{d}_{\mathbf{f}^v}$
5. $\quad \mathscr{F}_1 = \textbf{Feasibility}\left(\mathbf{C}, \mathbf{D}_o, \mathbf{f}^v\right)$
6. $\quad \mathbf{f}^v = \sup(\mathscr{B}_2) * \mathbf{d}_{\mathbf{f}^v}$
7. $\quad \mathscr{F}_2 = \textbf{Feasibility}\left(\mathbf{C}, \mathbf{D}_o, \mathbf{f}^v\right)$
8. $\quad$ **if** $(\mathscr{F}_1 * \mathscr{F}_2 = -1)$
9. $\quad\quad \mathscr{B}_1 = \mathscr{B}_2$
10. $\quad$ **else**
11. $\quad\quad \mathscr{B}_1 = \mathscr{B}_3$
12. $\|\mathbf{f}^v\| = \inf(\mathscr{B}_1)$
13. $\mathbf{f}^s = \|\mathbf{f}^v\| \mathbf{d}_{\mathbf{f}^v}$
14. **return** $\mathbf{f}^s$

La routine **WrenchSaturation** est basée sur un processus de dichotomie. Dans l'étape 1, la direction $\mathbf{d}_{\mathbf{f}^v}$ de l'effort $\mathbf{f}^v$ est définie et l'intervalle $\mathscr{B}_1$ sur lequel on effectue la bissection est considéré. La borne inférieure de cet intervalle est mise à zéro et la borne supérieure est égale au module de l'effort $\mathbf{f}^v$. La bissection de cet intervalle initial produit deux intervalles $\mathscr{B}_2$ et $\mathscr{B}_3$. Dans les étapes 4 et 6, l'effort $\mathbf{f}^v$ est calculé pour chaque borne de l'intervalle $\mathscr{B}_2$. La faisabilité de l'effort obtenu est testée à chaque fois dans les étapes 5 et 6. Si le produit $\mathscr{F}_1 * \mathscr{F}_2$ est négatif, l'intervalle $\mathscr{B}_1$ est remplacé par $\mathscr{B}_2$, sinon c'est $\mathscr{B}_3$ qui remplace $\mathscr{B}_1$. Un produit négatif traduit le fait que le point d'intersection entre la droite portée par le vecteur $\mathbf{f}^v$ et un des hyperplans du zonotope appartient à un des intervalles $\mathscr{B}_2$ ou $\mathscr{B}_3$. Le processus de bissection est arrêté quand la largeur de l'intervalle $\mathscr{B}_1$ est inférieure à un seuil δ. Dans l'étape 13, l'effort $\mathbf{f}^s$ de saturation est finalement déterminé.

4.3.2 Algorithme de gestion coordonnée

Maintenant que l'effort $\mathbf{f}^s$ est défini, on cherche à déterminer une combinaison possible de tensions dans les câbles permettant de contrecarrer cet effort. Ceci est l'objet de l'AGC de la tension des câbles. Comme le degré de redondance du robot MRGuide est faible, égal à 2, nous avons choisi d'implémenter l'algorithme proposé par [Mikelsons 2008]. Cet algorithme présente l'avantage d'être déterministe et compatible avec une implémentation temps-réel. L'approche consiste à résoudre le système d'équations linéaires sous-déterminé suivant :

$$\begin{aligned} &\mathbf{W}\boldsymbol{\tau}^d = \mathbf{f}^s \\ &\text{sous : } \boldsymbol{\tau}_{min} \leq \boldsymbol{\tau}^d \leq \boldsymbol{\tau}_{max} \end{aligned} \tag{4.11}$$

La solution du système d'équations (4.11) est de la forme :

$$\boldsymbol{\tau}^d = \mathbf{W}^+\mathbf{f}^s + \mathbf{Z}\boldsymbol{\lambda} \tag{4.12}$$

où $\mathbf{W}^+$ est la pseudo-inverse de la matrice $\mathbf{W}$. $\mathbf{Z}$ est une matrice de dimension (4×2) et $\boldsymbol{\lambda}$ est un vecteur colonne de dimension 2. Les tensions issues de $\mathbf{W}^+\mathbf{f}^s$ permettent de contrebalancer l'effort $\mathbf{f}^s$ tandis que celles issues de $\mathbf{Z}\boldsymbol{\lambda}$ permettent d'assurer une certaine rigidité dans le système, sans pour autant faire déplacer la plate-forme. La matrice $\mathbf{Z}$ est composée par deux vecteurs colonnes $\mathbf{z}_1$ et $\mathbf{z}_2$, qui forment une base du noyau de la matrice $\mathbf{W}$. Ces vecteur sont définis d'après [Lelong-Ferrand 2003] tels que :

$$\mathbf{z}_1 = \begin{pmatrix} \det\begin{pmatrix}\mathbf{w}_3 & \mathbf{w}_2\end{pmatrix} \\ \det\begin{pmatrix}\mathbf{w}_1 & \mathbf{w}_3\end{pmatrix} \\ \det\begin{pmatrix}\mathbf{w}_2 & \mathbf{w}_1\end{pmatrix} \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \mathbf{z}_2 = \begin{pmatrix} \det\begin{pmatrix}\mathbf{w}_4 & \mathbf{w}_2\end{pmatrix} \\ \det\begin{pmatrix}\mathbf{w}_1 & \mathbf{w}_4\end{pmatrix} \\ 0 \\ \det\begin{pmatrix}\mathbf{w}_2 & \mathbf{w}_1\end{pmatrix} \end{pmatrix} \tag{4.13}$$

où les vecteurs $\mathbf{w}_i$, $i \in [1, 4]$, représentent les colonnes de la matrice $\mathbf{W}$. Le vecteur $\boldsymbol{\lambda}$ est choisi de sorte que la contrainte dans (4.11) soit vérifiée. Cette contrainte s'écrit d'après (4.12) :

$$\boldsymbol{\tau}_{min} \leq \mathbf{W}^+\mathbf{f}^s + \mathbf{Z}\boldsymbol{\lambda} \leq \boldsymbol{\tau}_{max} \tag{4.14}$$

En soustrayant $\mathbf{W}^+\mathbf{f}^s$ des deux côtés de l'inégalité (4.14), on obtient :

$$\mathbf{p}_{min} \leq \mathbf{Z}\boldsymbol{\lambda} \leq \mathbf{p}_{max} \tag{4.15}$$

avec $\mathbf{p}_{min} = \boldsymbol{\tau}_{min} - \mathbf{W}^+\mathbf{f}^s$ et $\mathbf{p}_{max} = \boldsymbol{\tau}_{max} - \mathbf{W}^+\mathbf{f}^s$.

Il vient alors, sous forme développée :

$$\begin{pmatrix} p_{min,1} \\ p_{min,2} \\ p_{min,3} \\ p_{min,4} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \\ z_{31} & z_{32} \\ z_{41} & z_{42} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} p_{max,1} \\ p_{max,2} \\ p_{max,3} \\ p_{max,4} \end{pmatrix} \tag{4.16}$$

L'ensemble des solutions admissibles $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbb{R}^2$ satisfaisant l'inégalité matricielle (4.16) est représenté dans le plan $(\lambda_1\lambda_2)$ par une surface délimitée par des arêtes (cf. Figure 4.4). Chaque arête représente une des équations déduite de l'inégalité (4.16). La caractérisation de cet ensemble est effectuée en deux étapes. Dans la première étape, on cherche toutes les intersections possibles entre les arêtes. Pour y parvenir, on résout par paire d'équations toutes les combinaisons possibles des huit égalités déduites de (4.16). Dans la deuxième étape, on vérifie si les solutions obtenues satisfont le reste des inégalités. Seules les solutions admissibles sont retenues. Le nombre maximal de ces solutions admissibles est 24 avec une possibilité de solution multiples. Si tel est le cas, les solutions redondantes sont supprimées et la liste des solutions uniques

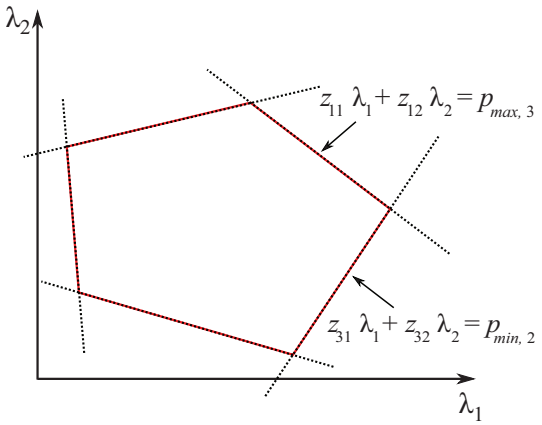

FIGURE 4.4 – Exemple d'une représentation de l'ensemble des solutions admissibles.

est définie. À partir de cette nouvelle liste, une enveloppe convexe est déterminée, qui représente l'ensemble des solutions admissibles de l'inégalité matricielle (4.16). N'importe quelle paire (λ_1, λ_2) appartenant à cette enveloppe convexe peut être alors utilisée pour calculer $\boldsymbol{\tau}^d$ solution du système d'équations linéaires (4.11).

L'approche proposée par [Mikelsons 2008] consiste à déterminer le centre de gravité $\boldsymbol{\lambda}_{cg}$ de l'ensemble des solutions admissibles. Pour ce faire, les sommets de l'enveloppe convexe sont triés selon un sens de rotation, trigonométrique ou anti-trigonométrique, et la décomposition en triangles de cette enveloppe est effectuée. Connaissant les coordonnées des sommets $\mathbf{v}_i^k = \begin{pmatrix} v_{ix}^k & v_{iy}^k \end{pmatrix}^T$, $i \in [1, 3]$, d'un triangle T_k, sa surface V^k est :

$$V^k = \frac{1}{2}\left(\left(v_{2x}^k - v_{1x}^k\right)\left(v_{3y}^k - v_{1y}^k\right) - \left(v_{3x}^k - v_{1x}^k\right)\left(v_{2y}^k - v_{1y}^k\right)\right) \tag{4.17}$$

Le centre de gravité du triangle T_k est :

$$\boldsymbol{\lambda}^k = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3} \mathbf{v}_j^k \tag{4.18}$$

et le centre de gravité $\boldsymbol{\lambda}_{cg}$ de l'ensemble des solutions admissibles est :

$$\boldsymbol{\lambda}_{cg} = \frac{\sum_{j=1}^{\mathrm{K}} \boldsymbol{\lambda}^k V^k}{\sum_{j=1}^{\mathrm{K}} V^k} \tag{4.19}$$

avec K le nombre de triangles issu de la décomposition de l'enveloppe convexe. Finalement, la solution du système d'équations linéaires (4.11) choisie est :

$$\boldsymbol{\tau}^d = \mathbf{W}^+\mathbf{f}^s + \mathbf{Z}\boldsymbol{\lambda}_{cg} \tag{4.20}$$

Comme démontré dans [Mikelsons 2008], cette solution est continue le long d'une trajectoire

à l'intérieur de l'espace de travail.

4.4 Évaluation expérimentale de la commande

4.4.1 Asservissement en position de la plate-forme du MRGuide

Nous souhaitons évaluer expérimentalement l'asservissement de la position de la plate-forme du robot MRGuide. Pour cela, nous considérons le schéma de commande de la Figure 4.2.

Le robot est positionné dans un plan horizontal, comme le montre la Figure 4.5. Les actionneurs sont situés à proximité du robot. Les câbles sont enroulés sur les poulies d'actionnement d'un côté, et attachés à la structure de l'autre, en passant par la plate-forme. La commande est implémentée en C sur une machine (Intel(R) Pentium(R) 4 CPU, 2.40 GHz), équipée d'un noyau Linux temps-réel. La période d'échantillonnage est choisie égale à $T_e = 1$ ms, au vu des déplacements envisagés.

Comme les tensions dans les câbles sont nulles ou quasi-nulles au repos, il est nécessaire de passer par une phase de pré-tension. Cette dernière permet en effet d'assurer une certaine rigidité au système, tout en évitant une discontinuité dans la tension des câbles une fois l'asservissement de la position démarré. Pour illustrer le problème de la discontinuité des tensions, qui aurait lieu sans plus de précautions, prenons l'exemple où la plate-forme est en position $(0 \quad 0)^T$ dans le repère $\mathbb{R}_0$. Les tensions minimale et maximale admissibles dans chaque câble sont fixées respectivement à 10 et 60 N. Si l'erreur en position est nulle, la tension de référence τ_i^d dans chaque câble, calculée par l'AGC, va être égale à la moyenne entre ces deux tensions, soit 35 N. Par conséquent, le calculateur demandera un couple équivalent

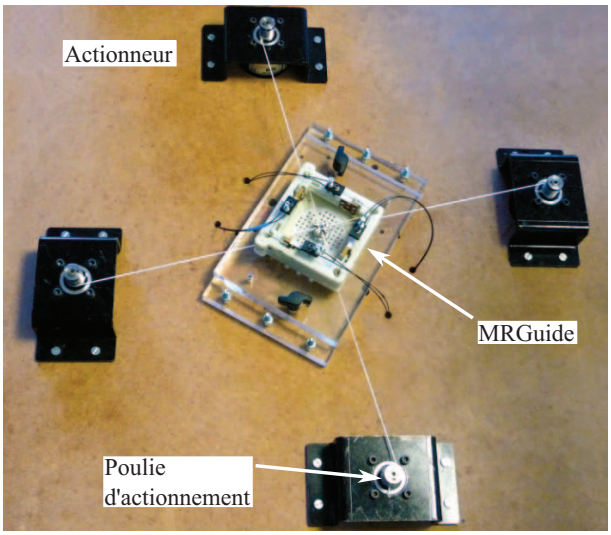

FIGURE 4.5 – Installation du robot MRGuide.

sur les 4 moteurs qui solliciterait mal le robot. Au même moment, l'asservissement de la position de la plate-forme risque de devenir instable en raison de cette discontinuité. Pour éviter une telle transition, il est nécessaire de réaliser une pré-tension avant de basculer en mode asservissement de position.

Par ailleurs, si une simple procédure de pré-tension est effectuée, la plate-forme risque de se déplacer car les frottements dans les différents câbles ne sont pas équivalents. Pour palier ce problème, nous proposons d'asservir la position de la plate-forme pendant la phase de pré-tension. Le schéma d'asservissement de la Figure 4.2 est conservé pendant la pré-tension et le suivi de trajectoire. Entre ces deux phases, la discontinuité dans la tension des câbles est écartée.

Phase de pré-tension

Pour réaliser la pré-tension en utilisant le schéma d'asservissement de la Figure 4.2, l'algorithme 4.3 est ajouté à l'AGC présenté précédemment.

Algorithme 4.3 Algorithme de pré-tension.

1. T_e, T_p, $i = 1$
2. **While** $\left(\mathrm{T}_e * i \leq \mathrm{T}_p\right)$ **do**
3. $\quad \boldsymbol{\tau}_{min} = 10 * \mathrm{T}_e * i / \mathrm{T}_p * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^T$
4. $\quad \boldsymbol{\tau}_{max} = 60 * \mathrm{T}_e * i / \mathrm{T}_p * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^T$
5. $\quad i = i + 1$

La première étape de l'algorithme 4.3 consiste à initialiser la période d'échantillonnage T_e et la durée de pré-tension T_p. À chaque pas d'échantillonnage et pendant uniquement la phase de pré-tension, les vecteurs $\boldsymbol{\tau}_{min}$ et $\boldsymbol{\tau}_{max}$ sont calculés (étapes 3 et 4). Ces vecteurs sont ensuite utilisés pour définir les bornes inférieure et supérieure de la contrainte dans (4.11). Ils sont également utilisés comme arguments dans la première étape de l'algorithme de faisabilité (cf. Algorithme 4.1). Une fois la faisabilité du torseur $\mathbf{f}^v$ issu de la correction vérifiée, l'AGC détermine une solution $\boldsymbol{\tau}^d$ au système d'équations linéaires (4.11). Au fur et à mesure que les tensions limites ($\boldsymbol{\tau}_{min}$, $\boldsymbol{\tau}_{max}$), augmentent, les tensions de référence ($\boldsymbol{\tau}^d$) augmentent aussi. À la fin de la pré-tension, les tensions minimale et maximale admissibles dans chaque câble atteindront respectivement 10 et 60 N (étapes 3 et 4, $\mathrm{T}_p = \mathrm{T}_e * i$). Ces tensions seront donc maintenues pendant la phase de suivi.

L'efficacité de la procédure de pré-tension basée sur l'Algorithme 4.3 et le schéma d'asservissement de la Figure 4.2 est évaluée sur le robot MRGuide. Pendant cette phase, la position désirée $\mathbf{x}^d$ de la plate-forme est fixée à $(0 \quad 0)^T$. La loi de commande est basée sur un simple correcteur proportionnel $\mathbf{C_x} = \mathbf{diag}\left(k_{px}, k_{py}\right)$ dont les gains k_{px} et k_{py} sont choisis identiques dans notre cas, égaux à 100. Comme le montre la Figure 4.6, les tensions de référence $\boldsymbol{\tau}^d$ dans les câbles montent graduellement jusqu'à atteindre la tension moyenne désirée. Les

tensions réelles dans les câbles, évaluées par les capteurs optiques au niveau de la structure, n'atteignent pas ces tensions de référence. Cela est dû à la présence de frottements, principalement au niveau des œillets et des points de passage des câbles sur la plate-forme. Ces frottements entrainent entre autre un retard d'environ cinq secondes, la mise en tension étant très progressive. Concernant la position de la plate-forme, reconstruite en utilisant le MGD, on constate une légère évolution due à la différence des tensions dans les câbles (cf. Figure 4.7).

Phase de suivi de trajectoire

Nous proposons ici de réaliser un suivi de trajectoire en nous basant toujours sur la structure de commande de la Figure 4.2. La plate-forme se déplace d'abord suivant l'axe $\mathbf{x}_0$ en faisant un aller-retour, puis suivant l'axe $\mathbf{y}_0$. Pour chaque déplacement, d'une position à une autre, les vitesses et accélérations aux points de départ et aux points d'arrivée sont nulles. La pré-tension des câbles est effectuée pendant 30 s avant de basculer en phase de suivi, comme le montre la Figure 4.8. Les gains k_{px} et k_{py} sont choisis identiques avec différentes valeurs. À chaque fois, le gain utilisé reste le même pendant la pré-tension et le suivi de trajectoire.

Comme on s'y attendait, l'erreur de suivi en position diminue quand les gains proportionnels augmentent. Elle peut donc être très faible si on augmente de manière adaptée ces gains. Néanmoins, rien ne garantit que les tensions réelles dans les câbles restent alors admissibles. Prenons le cas où la plus grande valeur de gain est considérée, soit $k_{px} = k_{py} = 8.10^4$. Les tensions de référence $\boldsymbol{\tau}^d$ et les tensions réelles dans les câbles au niveau de la structure sont représentées à la Figure 4.9. Nous constatons que les tensions de référence sont cohérentes

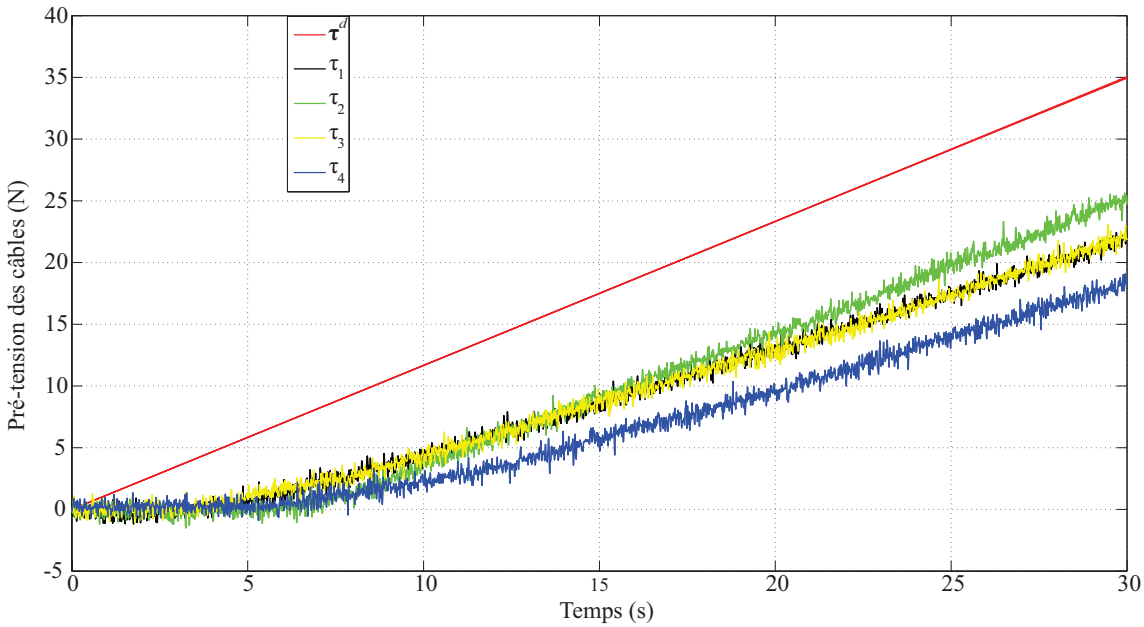

FIGURE 4.6 – Pré-tension des câbles en utilisant l'Algorithme 4.3.

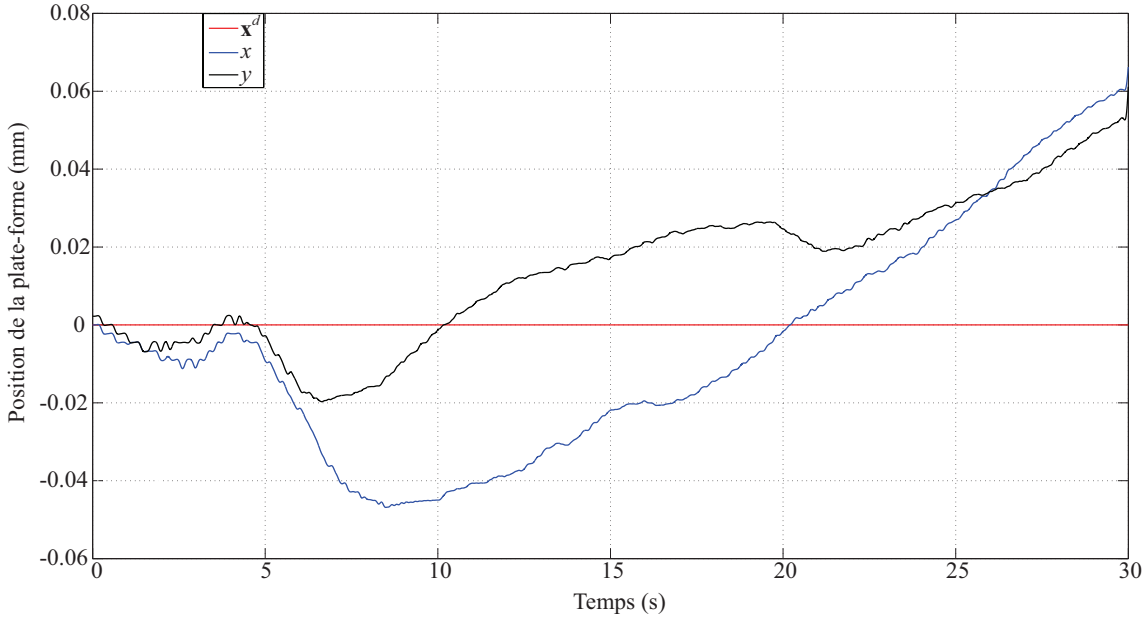

FIGURE 4.7 – Position de la plate-forme durant la pré-tension.

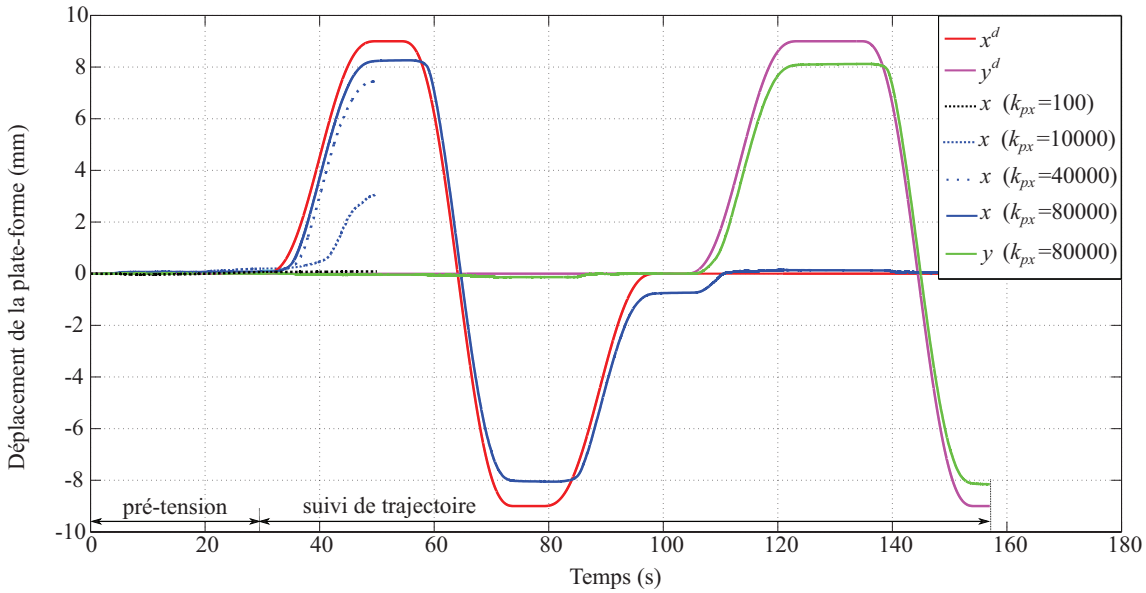

FIGURE 4.8 – Suivi de trajectoire pour différentes valeurs de gain de correction.

avec les déplacements de la plate-forme. Par exemple, pour un déplacement selon $\mathbf{x}_0$, ce sont les câbles 3 et 4 qui tirent plus pour faire déplacer la plate-forme. En revanche les tensions réelles évoluent de manière imprévisible car elle ne sont pas asservies. De plus, dans l'intervalle de temps [80, 100] s, la tension réelle dans le câble 2 dépasse même la tension maximale, fixée à 60 N. Des dépassements encore plus importants pourraient avoir lieu si les gains de correction étaient plus importants, sans que ces dépassements puissent être évalués par les capteurs optiques employés, vue l'étendue de mesure.

L'asservissement de la position de la plate-forme en utilisant le schéma de commande conventionnel n'est donc pas satisfaisant. Même si le suivi de trajectoire en position est relativement acceptable, les tensions dans les câbles elles ne le sont pas. Ce est d'autant plus vrai que l'erreur de suivi en position serait plus importante si les actionneurs étaient déportés car les frottements dans les gaines se rajouterait. Par ailleurs, les efforts appliqués par le radiologue sur la plate-forme lors de l'insertion d'aiguille risquent eux aussi de générer des tensions importantes dans les câbles. Si tel est le cas, la structure risque d'être endommagée. La nécessité de superviser la tension des câbles est donc claire, ce qui justifie a posteriori l'instrumentation de la structure pour disposer d'une mesure locale.

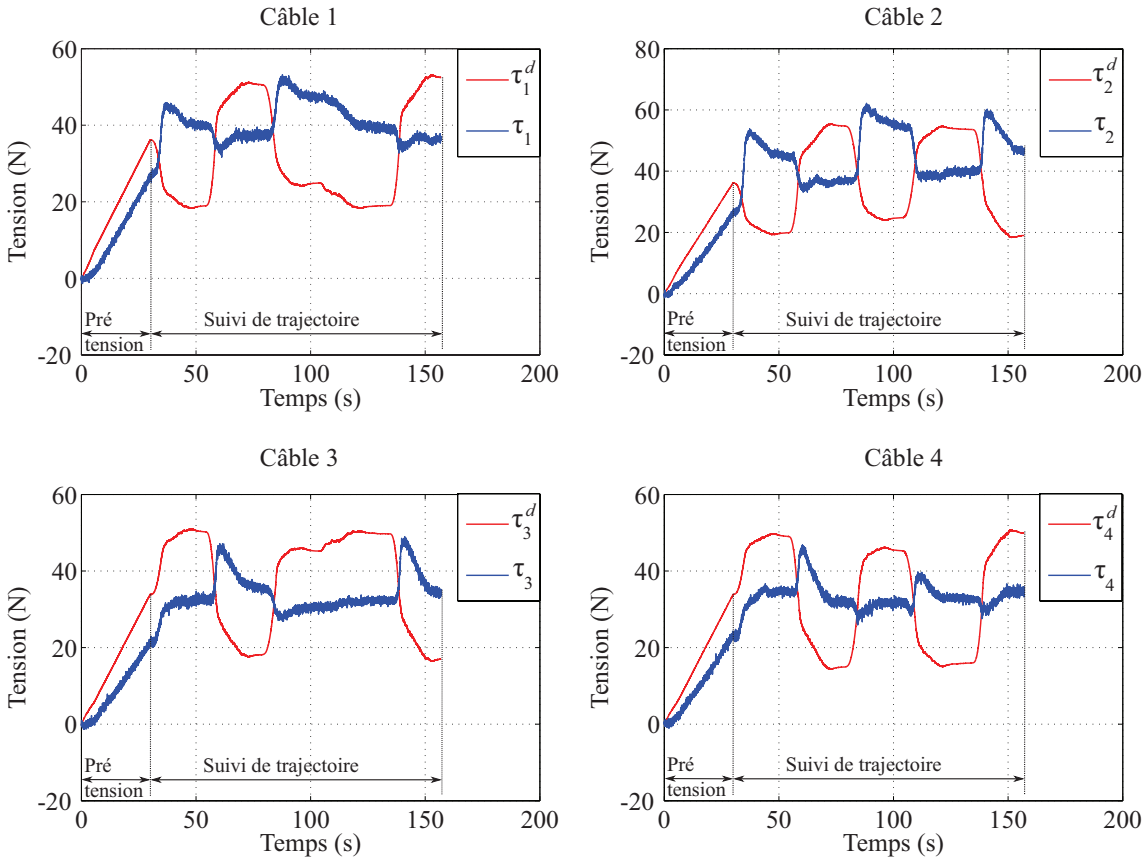

FIGURE 4.9 – Tensions de référence et tensions réelles dans les câbles.

4.4.2 Asservissement en position avec supervision de tension

La mesure locale de tension dans les câbles est intégrée en ajoutant au schéma de commande précédent une boucle interne de supervision pour asservir la tension des câbles. Ce principe de commande, illustré à la Figure 4.10, est en fait similaire à celui appliqué aux erreurs de vitesse des moteurs à courant continu où une boucle interne en courant est implémentée, notamment pour éviter les pics de courant au démarrage. Cette boucle permet de manière équivalente de superviser les courants d'induit.

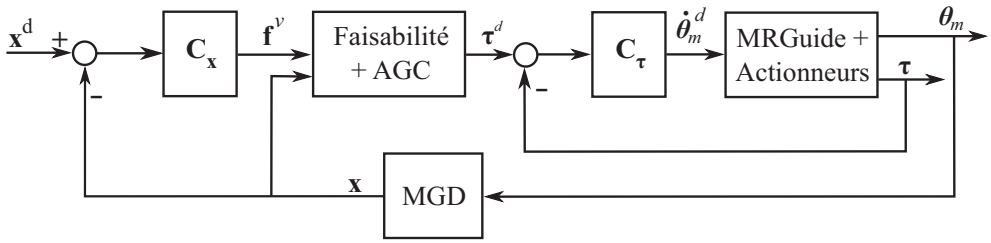

FIGURE 4.10 – Principe de l'asservissement de la position du robot MRGuide, avec boucle interne d'asservissement de la tension des câbles.

Les actionneurs sont commandés en vitesse, comme le montre la Figure 4.10. Le schéma d'asservissement est détaillé dans la Figure 4.11. Les vitesses articulaires $\dot{\boldsymbol{\theta}}_m$ sont calculées en dérivant les positions articulaires $\boldsymbol{\theta}_m$. Comme la boucle de vitesse est interne à la boucle de tension, elle doit être précise et plus rapide. Pour y parvenir, un correcteur proportionnel-intégral est considéré, et le correcteur est réglé pour que le temps de réponse à 5% soit de 30 ms. Les résultats obtenus alors sont illustrés à la Figure 4.12. Au vu des dynamiques envisagées pour la vitesse des moteurs, ce même correcteur ne permet pas d'avoir les mêmes performances. En effet, à faible vitesse l'estimation de celles-ci est complètement biaisée par le bruit de quantification. L'amplitude de ce dernier est égale à 0.79 rad/s compte tenues de la résolution des codeurs et de la fréquence à laquelle les vitesses articulaires sont calculées. Pour pallier ce problème, une boucle externe de position est rajoutée à la boucle de vitesse où un simple correcteur proportionnel est considéré. Les consignes de position articulaire $\boldsymbol{\theta}_m^d$ sont calculées en intégrant numériquement les vitesses de consignes $\dot{\boldsymbol{\theta}}_m^d$, comme illustré sur la Figure 4.13.

En ce qui concerne la boucle de supervision de tension (cf. Figure 4.10), les tensions évaluées par les capteurs optiques au niveau de la structure sont comparées avec celles calculées par l'AGC. L'asservissement de tension est effectué par un correcteur noté $\mathbf{C}_{\boldsymbol{\tau}}$, l'objectif étant en particulier de rejeter les perturbations dues aux frottements dans les câbles. Pour y parvenir, un correcteur proportionnel-intégral est choisi. Sa matrice de transfert, de dimension (4×4), est choisie diagonale, soit $\mathbf{C}_{\boldsymbol{\tau}} = \mathbf{diag}(c_\tau, c_\tau, c_\tau, c_\tau)$. Les termes de la diagonale, choisis identiques,

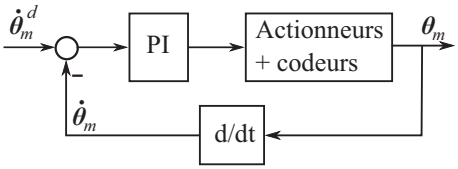

FIGURE 4.11 – Asservissement de la vitesse des actionneurs.

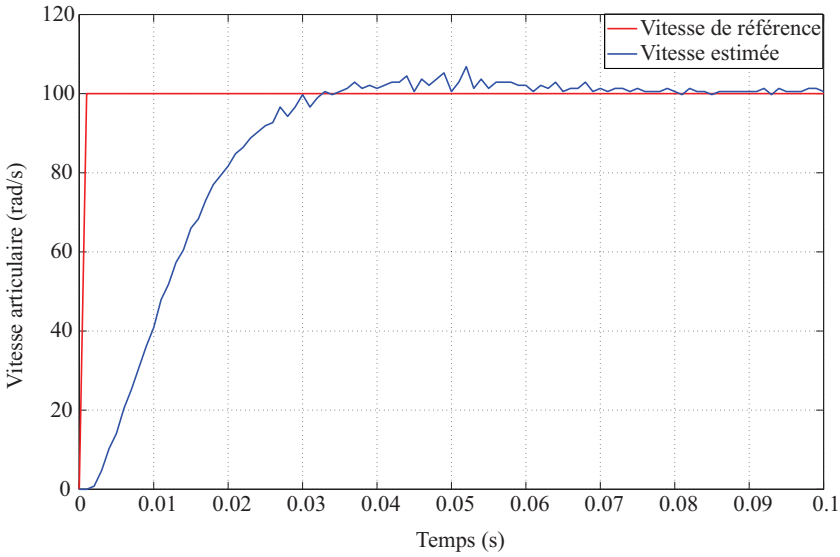

FIGURE 4.12 – Asservissement du moteur à grande vitesse.

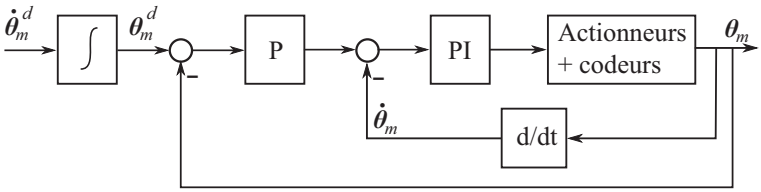

FIGURE 4.13 – Principe de la commande en vitesse par un asservissement de la position articulaire.

sont définis par :

$$c_\tau = k_{p\tau} + \frac{k_{i\tau}}{s} \tag{4.21}$$

Le choix des gains $k_{p\tau}$ et $k_{i\tau}$ est empirique pendant la phase de pré-tension. Pendant cette phase, la position de la plate-forme est asservie à $(0 \quad 0)^T$. Dans un premier temps, les gains proportionnels k_{px} et k_{py} du correcteur de position sont considérés identiques, égaux à $k_{px} = k_{py} = 5.10^3$ tandis que le gain intégral $k_{i\tau}$ du correcteur de tension est nul. Le gain proportionnel $k_{p\tau}$ est augmenté graduellement jusqu'à ce que la boucle de tension devienne instable. Ensuite dans un deuxième temps, le gain $k_{p\tau}$ est sensiblement diminué alors que le gain $k_{i\tau}$ est augmenté graduellement. Avec ce réglage empirique, le meilleur résultat est obtenu pour $k_{i\tau} = 0.15$ et $k_{p\tau} = 0.5$

Sur la Figure 4.14, on constate que l'évolution des tensions pendant la phase de pré-tension n'est pas la même pour tous les câbles. Cela vient du fait que les frottements dans les câbles entre la structure et les actionneurs sont différents, ce qui résulte en un faible déplacement de la plate-forme (cf. Figure 4.15). Ce petit déplacement peut être réduit en jouant sur les gains des correcteurs de position et de tension. Néanmoins, ce réglage est difficile car il y a 3 paramètres à régler. Il est par ailleurs délicat car la stabilité du système dépend de la stabilité des deux boucles d'asservissement.

En ce qui concerne le suivi de position, nous avons réalisé la même trajectoire que précédemment, à savoir un déplacement suivant l'axe $\mathbf{x}_0$ dans les deux sens, puis suivant l'axe $\mathbf{y}_0$ (cf. Figure 4.15). Les gains de correction utilisés pendant la pré-tension des câbles sont conservés pendant la phase de suivi. Comme l'on peut constater, le suivi de position est relativement bon, avec un dépassement de 10 % et une erreur statique qui tend vers 0 en régime permanent. Ce dépassement pourrait être réduit en ajoutant un terme dérivé dans le correcteur de position. De nouveau, ce réglage reste délicat car la stabilité du système dépend de la stabilité des deux boucles d'asservissement. En plus du suivi de position, on peut observer que le suivi de tension est très bon (cf. Figure 4.14) comparé à celui de la Figure 4.9. L'ajout de la boucle interne dans le schéma d'asservissement conventionnel (cf. Figure 4.2) a nettement amélioré le suivi de tension. De plus, l'utilisation d'un correcteur proportionnel-intégral a permis de rejeter correctement les frottements dans les câbles entre la structure et les actionneurs. Par conséquent, cette nouvelle stratégie de commande offre un résultat comparable en suivi de position et un bien meilleur résultat en suivi de tension.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué la commande du robot MRGuide. Les modèles nécessaires à la commande ont été établis. Comme la tension des câbles est nulle au repos, un algorithme de pré-tension des câbles a été développé. Cet algorithme est intégré directement dans la boucle d'asservissement afin de contrôler pendant la pré-tension la position de la plate-forme,

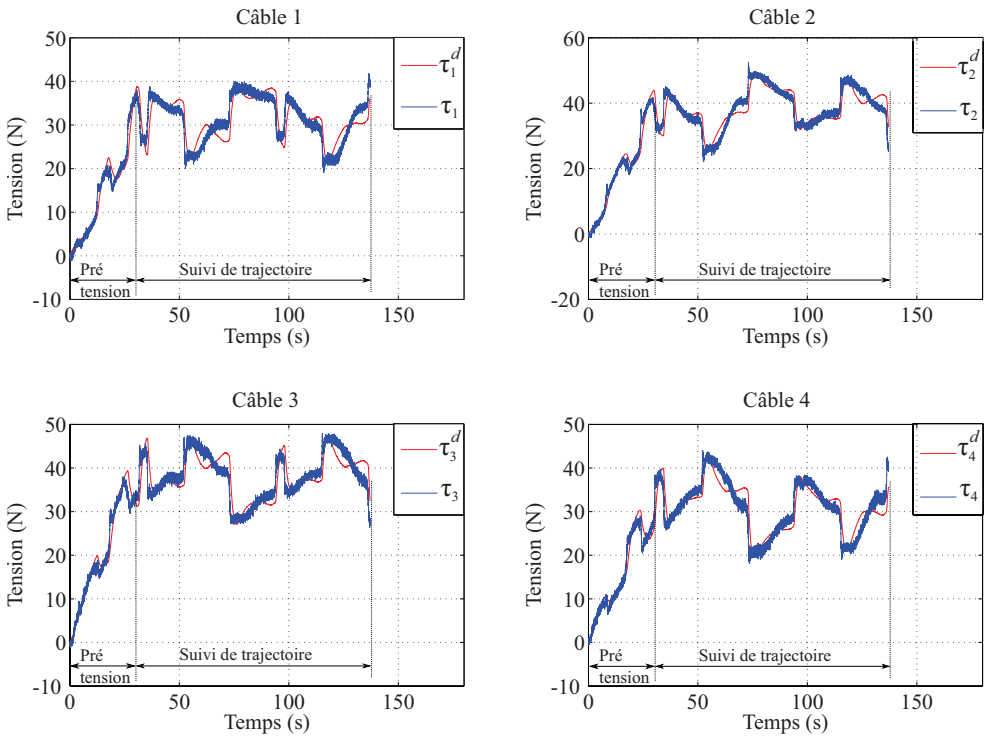

FIGURE 4.14 – Tensions des câbles pendant l'asservissement de la position.

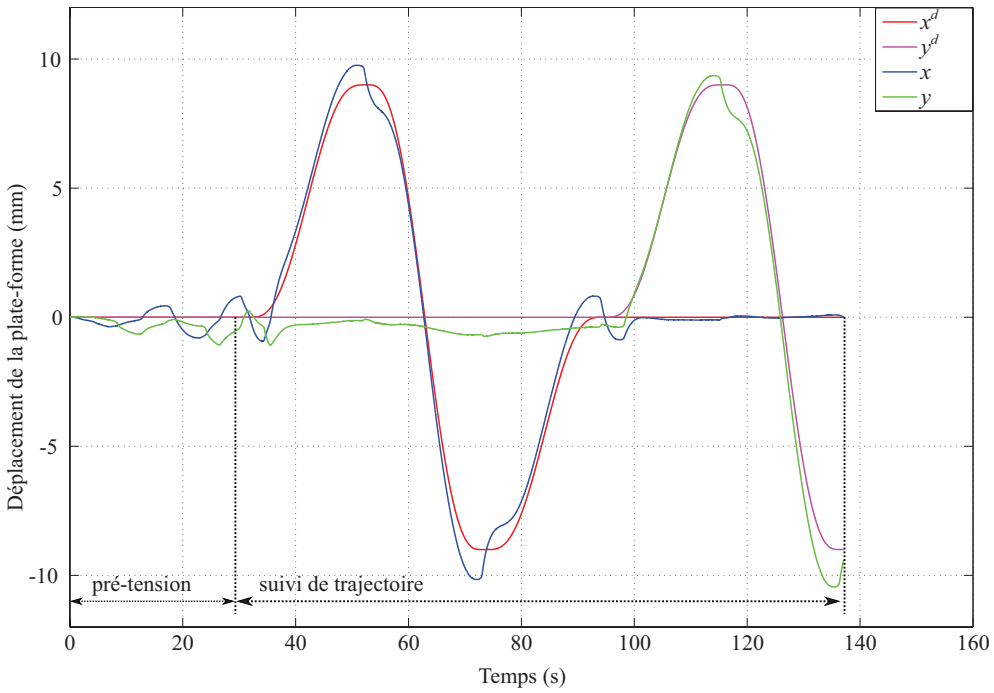

FIGURE 4.15 – Suivi de trajectoire basé sur le schéma de commande de la Figure 4.10.

si bien que le schéma de commande est le même pendant la phase de pré-tension et la phase de suivi de trajectoire. Cet algorithme permet entre autre d'éviter d'avoir des tensions trop importantes ou discontinues une fois la boucle d'asservissement mise en route.

Dans un premier temps, l'asservissement de la position de la plate-forme a été réalisé en utilisant un schéma de commande conventionnel avec un simple correcteur proportionnel. D'après les résultats expérimentaux obtenus, l'erreur de suivi en position est relativement satisfaisante. Néanmoins, la présence de frottements engendre des tensions élevées au niveau de la structure. Pour éviter cela, nous avons proposé une nouvelle stratégie de commande basée sur l'utilisation d'une boucle interne dans la boucle d'asservissement de position. Cette boucle permet la supervision de la tension dans les câbles. Un correcteur proportionnel-intégral a été considéré pour cette boucle de tension afin de rejeter les perturbations dues aux frottements. Les résultats obtenus en suivi de position sont comparables avec ceux où uniquement la position est asservie mais un bien meilleur suivi de tension est obtenu. Ces résultats montrent ainsi l'intérêt de considérer la supervision de tension dans le schéma de commande.

5 Conclusion

5.1 Conclusions

La réalisation des gestes percutanés dans l'IRM ouvre la voie à des pratiques médicales prometteuses. En revanche, l'utilisation de l'IRM reste à ce jour limitée, et ce malgré l'intérêt en terme de qualité d'image. Cela est dû principalement à l'étroitesse du tunnel et à la complexité des gestes réalisés. Pour rendre accessibles de telles pratiques, une assistance robotique semble très pertinente. Pour le concepteur, la réalisation d'un système robotisé compatible IRM n'est pas une tâche facile, étant donné l'espace disponible et la présence d'un champ magnétique intense. C'est dans ce contexte que nous avons développé un assistant robotique, MRGuide, dédié aux traitements du cancer de la prostate dans l'IRM.

Dans le premier chapitre, un cahier des charges médical associé à la conception de ce mécanisme a été établi. Une analyse a été par ailleurs menée sur les différents systèmes robotiques compatibles avec IRM. N'ayant pas les caractéristiques souhaitées pour remplir le cahier des charges, nous avons donc proposé un assistant robotique original basé sur un robot à câbles instrumenté avec un actionnement déporté. Le protocole médical associé à son utilisation a été finalement décrit.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés au dimensionnement du robot à câbles instrumenté. Comme l'actionnement est déporté, une instrumentation originale pour évaluer la tension des câbles dans l'IRM a été développée, afin de pouvoir ensuite commander correctement le dispositif. L'espace de travail associé à ce type de robot a été défini. Selon la stratégie de mesure considérée, nous avons étudié l'impact de l'instrumentation sur la caractérisation de l'espace de travail. Nous avons par ailleurs proposé une démarche de conception pour optimiser la géométrie du robot et évalué son efficacité sur différentes architectures dans le contexte de l'application médicale envisagée.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes focalisés sur la technologie de l'instrumentation. Nous avons présenté le principe de l'instrumentation et effectué une évaluation expérimentale sur un banc de test dédié. Un prototype a par ailleurs été réalisé afin de valider la

preuve du concept. L'évaluation de ce dernier en terme de compatibilité a été accomplie avec succès. L'étalonnage des capteurs employés a été réalisé sur la structure du robot.

Dans le dernier chapitre, nous nous sommes intéressés au développement d'une stratégie de commande adaptée au robot MRGuide. Nous avons évalué dans un premier temps une stratégie de commande conventionnelle dans l'espace opérationnel où uniquement la position de la plate-forme est asservie. N'ayant pas les performances souhaitées, principalement en terme de suivi de tension, du fait des frottements importants dans le dispositif, nous avons proposé une nouvelle stratégie de commande, utilisant les capteurs de tension développés. Cette stratégie a été évaluée sur le prototype du MRGuide où l'intérêt qu'elle apporte a été finalement démontré.

5.2 Perspectives

Dans la perspective de cette thèse, nous souhaitons mettre en avant quelques éléments de réflexion qui nous semblent pertinents. Concernant le dimensionnement des robots à câbles instrumentés, il serait intéressant de développer une méthode d'optimisation appropriée au cas d'une instrumentation basée sur une mesure de déformation. La méthode de caractérisation que nous avons développé peut constituer une première étape vers cette optimisation où une approche par intervalles pourrait être envisagée. La démarche de conception que nous avons proposé dans le cas d'une instrumentation basée sur une mesure de déplacement s'est avérée adaptée à notre contexte et il serait intéressant de l'appliquer dans d'autres contextes.

Le dispositif MRGuide tel qu'il est conçu est d'une compacité favorable à l'intégration dans le scanner. Cependant, l'instrumentation reste encore à améliorer. Les capteurs optiques employés pour évaluer la tension des câbles sont encombrants. De plus, leur disposition n'est actuellement pas optimale car leur emplacement rend délicat leur réglage. Intégrer les fibres au sein même de la structure serait une solution intéressante à envisager. On peut pour cela utiliser les propriétés des capteurs à fibres optiques à réseau de Bragg pour réaliser la mesure. Ainsi, la compacité du mécanisme pourrait être encore améliorée.

Pour améliorer la stratégie de commande où l'asservissement de la tension est considérée, il nous semble très pertinent d'étudier un protocole d'identification tenant compte de la nature multi-variable du robot MRGuide. Nous avons commencé à étudier cette problématique, en proposant une modélisation globale du système (voir annexe B). Ce travail nécessite encore des développements, étant donnée la complexité du modèle.

Enfin, une étape importante dans le projet global autour du dispositif MRGuide est bien entendu de poursuivre son développement, qui passe maintenant par son évaluation dans le scanner, avec des interactions entre le radiologue et le dispositif. L'intérêt de l'approche de commande devrait alors apparaître de manière encore plus distincte, étant donnée la longueur des câbles mise en jeu. Nous devrons pour cela intégrer dans le schéma de commande l'utilisation des codeurs optiques développés pour l'évaluation de la position de la

plate-forme.

Comme nous l'avons vu au cours de ce travail, l'utilisation des robots à câbles permet d'avoir des mécanismes compacts et légers. L'emploi des câbles offre entre autre la possibilité de déporter l'actionnement pour rendre ces mécanismes encore plus compacts et légers. Il nous parait alors intéressant d'envisager leur utilisation dans d'autres contextes médicaux où l'encombrement est souvent problématique.

A Modèles tenant compte de la géométrie du MRGuide

Pour établir les modèles géométriques et cinématiques précis du robot MRGuide, la géométrie exacte de celui-ci est considérée. Les points d'attache des câbles sur la structure et les points de passage de ceux-ci au niveau des œillets sont notés respectivement $\mathrm{A}_{\mathrm{s}j}$ et $\mathrm{A}_{\mathrm{i}j}$, $j \in [1,4]$ (cf. Figure A.1). Ces points sont répartis respectivement sur deux cercles de rayon $\mathrm{R_s}$ et $\mathrm{R_i}$, comme le montre la Figure A.2. Les indices s et i désignent respectivement supérieur (structure) et inférieur (œillet). Soient ${}^0\mathbf{a}_{js}$ et ${}^0\mathbf{a}_{ji}$, $j \in [1,4]$, les vecteurs définissant respectivement les coordonnées des points $\mathrm{A}_{\mathrm{s}j}$ et $\mathrm{A}_{\mathrm{i}j}$ dont les coordonnées sont exprimées dans le repère $\mathbb{R}_0$ par :

$$ {}^0\mathbf{a}_{\mathrm{s}j} = \begin{pmatrix} \mathrm{R_s}\cos\alpha_j \\ \mathrm{R_s}\sin\alpha_j \\ \mathrm{H} \end{pmatrix} \qquad {}^0\mathbf{a}_{\mathrm{i}j} = \begin{pmatrix} \mathrm{R_i}\cos\alpha_j \\ \mathrm{R_i}\sin\alpha_j \\ 0 \end{pmatrix} $$

Soit $\mathbb{R}_m = (O_m, \mathbf{x}_m, \mathbf{y}_m, \mathbf{z}_m)$ un repère mobile lié à la plate-forme. La pose $\mathbf{x} = (x \quad y \quad \varphi)^T$ de la plate-forme est définie par deux coordonnées de position et une de rotation. Les coordonnées $(x \quad y)$ définissent la position du point O_m dans le repère $\mathbb{R}_0$ tandis que l'angle φ est défini par l'angle $(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_m)$. La matrice de transformation homogène ${}^0\mathbf{T}_m$ et la matrice de rotation ${}^0\mathbf{R}_m$

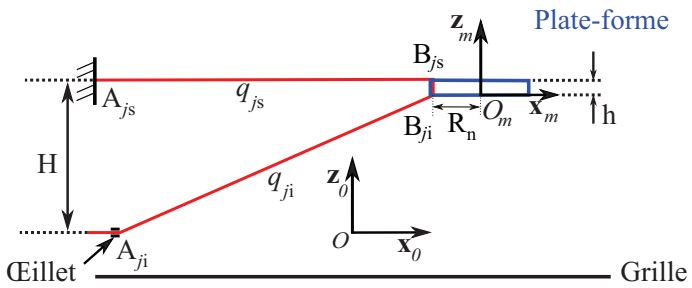

FIGURE A.1 – Schématisation du MRGuide, vue de côté.

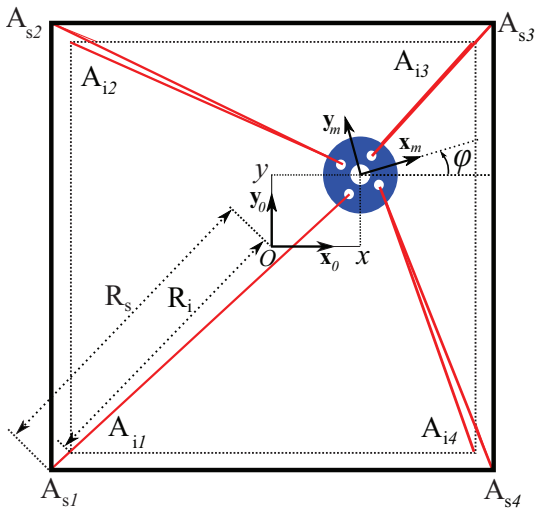

FIGURE A.2 – Schématisation du MRGuide, vue de dessus.

entre les repères $\mathbb{R}_0$ et $\mathbb{R}_m$ sont définies comme suit :

$$ {}^0\mathbf{T}_m = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 & x \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & \mathrm{H}-\mathrm{h} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad {}^0\mathbf{R}_m = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{A.1} $$

Les vecteurs ${}^m\mathbf{b}_{\mathrm{s}j}$ et ${}^m\mathbf{b}_{\mathrm{i}j}$, définissent respectivement les coordonnées des points de passage supérieurs $\mathrm{B}_{\mathrm{s}j}$ et inférieurs $\mathrm{B}_{\mathrm{i}j}$ du câble j sur la plate-forme. Ces points de passage sont situés sur un cercle de rayon R_n. Dans le repère $\mathbb{R}_m$:

$$ {}^m\mathbf{b}_{\mathrm{s}j} = \begin{pmatrix} \mathrm{R}_\mathrm{n}\cos\alpha_j \\ \mathrm{R}_\mathrm{n}\sin\alpha_j \\ \mathrm{h} \end{pmatrix} \qquad {}^m\mathbf{b}_{\mathrm{i}j} = \begin{pmatrix} \mathrm{R}_\mathrm{n}\cos\alpha_j \\ \mathrm{R}_\mathrm{n}\sin\alpha_j \\ 0 \end{pmatrix} \tag{A.2} $$

et dans $\mathbb{R}_0$ grâce à la matrice de transformation ${}^0\mathbf{T}_m$:

$$ \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{b}_{\mathrm{s}j} \\ 1 \end{pmatrix} = {}^0\mathbf{T}_m \begin{pmatrix} {}^m\mathbf{b}_{\mathrm{s}j} \\ 1 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{b}_{\mathrm{i}j} \\ 1 \end{pmatrix} = {}^0\mathbf{T}_m \begin{pmatrix} {}^m\mathbf{b}_{\mathrm{i}j} \\ 1 \end{pmatrix} \tag{A.3} $$

Modèle géométrique inverse

Le MGI permet d'établir la longueur des câbles à partir de la pose $\mathbf{x}$ de la plate-forme. Soit $\mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_1 & q_2 & q_3 & q_4 \end{pmatrix}^T$ le vecteur des configurations qui contient la longueur des câbles. Chaque configuration q_j représente la longueur du câble j entre le point d'attache A_{js} et le

point de passage $\mathrm{A}_{\mathrm{i}j}$. Cette longueur est donnée par :

$$q_j = q_{\mathrm{s}j} + q_{\mathrm{i}j} + \mathrm{h} \tag{A.4}$$

avec :

$$\begin{cases} q_{\mathrm{s}j} = \|{}^0\mathbf{b}_{\mathrm{s}j} - {}^0\mathbf{a}_{\mathrm{s}j}\| \\ q_{\mathrm{i}j} = \|{}^0\mathbf{b}_{\mathrm{i}j} - {}^0\mathbf{a}_{\mathrm{i}j}\| \end{cases} \tag{A.5}$$

ou encore sous forme développée :

$$\begin{cases} q_{\mathrm{s}j} = \sqrt{\left(\mathrm{R_n}\cos\left(\varphi+\alpha_j\right)+x-\mathrm{R_s}\cos\alpha_j\right)^2+\left(\mathrm{R_n}\sin\left(\varphi+\alpha_j\right)+y-\mathrm{R_s}\sin\alpha_j\right)^2} \\ q_{j\mathrm{i}} = \sqrt{\left(\mathrm{R_n}\cos\left(\varphi+\alpha_j\right)+x-\mathrm{R_i}\cos\alpha_j\right)^2+\left(\mathrm{R_n}\sin\left(\varphi+\alpha_j\right)+y-\mathrm{R_i}\sin\alpha_j\right)^2+(\mathrm{H}-\mathrm{h})^2} \end{cases} \tag{A.6}$$

Modèle géométrique direct

Le MGD permet d'établir la pose $\mathbf{x}$ de la plate-forme à partir de la longueur des câbles. Les équations du MGI (A.4), pour $j \in [1, 4]$, forment un système d'équations non linéaires dont l'inversion n'est pas triviale. L'alternative à cette méthode est donc d'utiliser une approche numérique. Cette dernière consiste à minimiser la différence entre les équations du MGI (A.4) et l'évaluation de la longueur des câbles. Cette différence est exprimée par :

$$g_j(\mathbf{x}) = \|{}^0\mathbf{b}_{\mathrm{s}j} - {}^0\mathbf{a}_{\mathrm{s}j}\| + \|{}^0\mathbf{b}_{\mathrm{i}j} - {}^0\mathbf{a}_{\mathrm{i}j}\| - q_j \qquad j \in [1, 4] \tag{A.7}$$

Connaissant l'angle de rotation θ_{mj} de chaque moteur et le rayon R_p de la poulie d'actionnement, la longueur q_j est évaluée grâce à l'équation suivante :

$$q_j = q_{j0} + \mathrm{R_p}\theta_{mj} \tag{A.8}$$

avec q_{j0} la longueur du câble j quand la plate-forme est à l'origine O du repère $\mathbb{R}_0$ et que son orientation est nulle :

$$q_{j0} = \mathrm{R}_s - \mathrm{R}_n + \mathrm{h} + \sqrt{(\mathrm{R}_n - \mathrm{R}_i)^2 + (\mathrm{H}-\mathrm{h})^2} \tag{A.9}$$

Pour déterminer la pose $\mathbf{x}$ de la plate-forme, la fonction suivante doit être minimisée :

$$\mathbf{x} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \quad \sum_{j=1}^{4} \left(g_j(\mathbf{x})\right)^2 \tag{A.10}$$

L'algorithme que nous avons implémenté pour minimiser cette erreur est celui développé dans [Pott 2010]. Il est basé sur la méthode classique de Levenberg-Marquardt.

Modèle cinématique inverse

La matrice jacobienne **J** est obtenue en dérivant le MGI représenté par l'équation (A.4), pour $j \in [1, 4]$. Elle est de dimension (4×3) :

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial q_1}{\partial \mathrm{x}} & \frac{\partial q_1}{\partial \mathrm{y}} & \frac{\partial q_1}{\partial \varphi} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial q_4}{\partial \mathrm{x}} & \frac{\partial q_4}{\partial \mathrm{y}} & \frac{\partial q_4}{\partial \varphi} \end{pmatrix} \tag{A.11}$$

avec :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial q_j}{\partial x} = \dfrac{1}{q_{\mathrm{s}j}}\Big(\mathrm{R_n}\cos\left(\varphi+\alpha_j\right)+x-\mathrm{R_s}\cos\alpha_j\Big)+\dfrac{1}{q_{\mathrm{i}j}}\Big(\mathrm{R_n}\cos\left(\varphi+\alpha_j\right)+x-\mathrm{R_i}\cos\alpha_j\Big) \\ \dfrac{\partial q_j}{\partial y} = \dfrac{1}{q_{\mathrm{s}j}}\Big(\mathrm{R_n}\sin\left(\varphi+\alpha_j\right)+y-\mathrm{R_s}\sin\alpha_j\Big)+\dfrac{1}{q_{\mathrm{i}j}}\Big(\mathrm{R_n}\sin\left(\varphi+\alpha_j\right)+y-\mathrm{R_i}\sin\alpha_j\Big) \\ \dfrac{\partial q_j}{\partial \varphi} = \dfrac{1}{q_{\mathrm{s}j}}\Big(\mathrm{R_n}\cos\left(\varphi+\alpha_j\right)\Big(\mathrm{R_n}\sin\left(\varphi+\alpha_j\right)+y-\mathrm{R_s}\sin\alpha_j\Big)-\mathrm{R_n}\sin\left(\varphi+\alpha_j\right)\Big(\mathrm{R_n}\cos\left(\varphi+\alpha_j\right)+x-\mathrm{R_s}\cos\alpha_j\Big)\Big) \\ \qquad +\dfrac{1}{q_{\mathrm{i}j}}\Big(\mathrm{R_n}\cos\left(\varphi+\alpha_j\right)\Big(\mathrm{R_n}\sin\left(\varphi+\alpha_j\right)+y-\mathrm{R_i}\sin\alpha_j\Big)-\mathrm{R_n}\sin\left(\varphi+\alpha_j\right)\Big(\mathrm{R_n}\cos\left(\varphi+\alpha_j\right)+x-\mathrm{R_i}\cos\alpha_j\Big)\Big) \end{cases}$$

La matrice des torseurs unitaires **W** est égale à $-\mathbf{J}^T$.

B Modèle dynamique du robot

L'objectif est d'établir le modèle dynamique du robot MRGuide pour en déduire une approximation linéaire susceptible d'être identifiée. Pour y parvenir, nous considérons une géométrie légèrement simplifiée du robot. La structure du robot est supposée plane, comme représentée sur la Figure B.1. La plate-forme est considérée comme un point matériel de masse m_p. Sa position dans le repère $\mathbb{R}_0$ est définie par $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix}^T$. Nous considérons par ailleurs que les câbles de masse négligeable, avec une même raideur k_c.

Modèle dynamique de la plate-forme

Pour une position $\mathbf{x}$ donnée, le bilan des forces appliquées à la plate-forme est :

$$\mathbf{M}_p\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{f}_p = \mathbf{W}\boldsymbol{\tau} \tag{B.1}$$

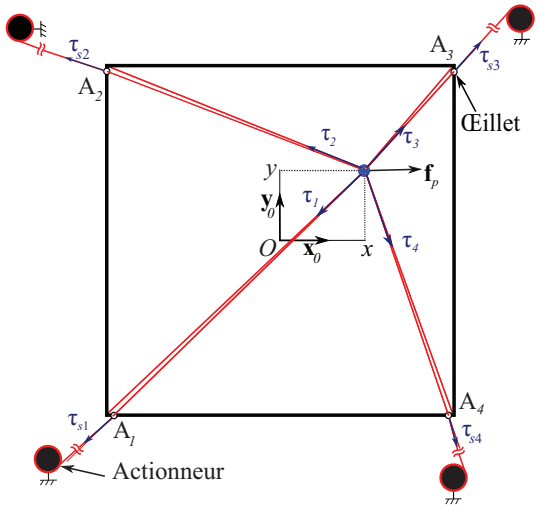

FIGURE B.1 – Représentation des efforts appliqués sur la plate-forme.

avec :

$\mathbf{f}_p = \mathbf{F}_v\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{f}_s$	vecteur des forces de frottement entre la plate-forme et la grille.
$\mathbf{F}_v = \mathbf{diag}\left(f_{vx}, f_{vy}\right)$	matrice, de dimension 2, des coefficients de frottement visqueux.
$\mathbf{f}_s = \mathbf{f}_s\left(\dot{\mathbf{x}}\right)$	vecteur des coefficients de frottement sec.
$\mathbf{M}_p = \mathbf{diag}\left(m_p, m_p\right)$	matrice d'inertie de la plate-forme.
$\boldsymbol{\tau} = (\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_4)^T$	vecteur des tensions dans les câbles au niveau de la plate-forme.

On note par $\boldsymbol{\tau}_s = (\tau_{s1} \quad \tau_{s2} \quad \tau_{s3} \quad \tau_{s4})^T$ le vecteur des tensions dans les câbles à l'extérieur de la structure MRGuide (cf. Figure B.1). La présence de frottement au niveau des œillets induit une différence entre ces tensions et celles au niveau de la plate-forme. Cette différence peut être exprimée par :

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_s + \mathbf{f}_c\left(\dot{\mathbf{q}}\right) \tag{B.2}$$

où $\mathbf{f}_c$ représente le vecteur des forces de frottement dans les câbles au niveau des œillets. Ce vecteur est fonction de la vitesse de déplacement des câbles au niveau de la structure, caractérisée par le vecteur $\dot{\mathbf{q}}$. Ce dernier peut être exprimé en fonction des vitesses opérationnelles $\dot{\mathbf{x}}$ par :

$$\dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{W}^T\dot{\mathbf{x}} \tag{B.3}$$

Modèle dynamique de l'actionneur

Sur la Figure B.2, un câble est enroulé sur une poulie montée sur l'actionneur. Le rayon de cette poulie est noté R_p. Le couple Γ_{mj} et l'angle θ_{mj} de rotation du moteur j sont choisis positifs dans le sens trigonométrique. La tension dans le câble j et la variation de sa longueur au niveau de l'actionneur sont notées respectivement τ_{mj} et q_{mj}.

Le modèle dynamique de l'ensemble des actionneurs, exprimé sous forme matricielle, est donné par :

$$\mathrm{R}_p\boldsymbol{\tau}_m + \boldsymbol{\Gamma}_m = \mathbf{J}_m\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{F}_{mv}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{f}_{ms} \tag{B.4}$$

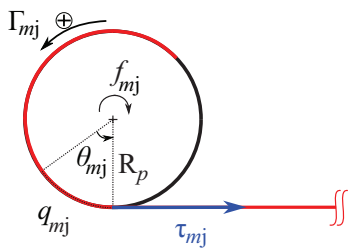

FIGURE B.2 – Modélisation de l'actionneur.

où :

$\mathbf{J}_m = j_m \mathbf{I}_4$	matrice d'inertie (actionneurs + poulies d'actionnement).
$\boldsymbol{\theta}_m = (\theta_{m1} \quad \theta_{m2} \quad \theta_{m3} \quad \theta_{m4})^T$	vecteur des positions articulaires des moteurs
$\boldsymbol{\Gamma}_m = (\Gamma_{m1} \quad \Gamma_{m2} \quad \Gamma_{m3} \quad \Gamma_{m4})^T$	vecteur des couple moteurs
$\boldsymbol{\tau}_m = (\tau_{m1} \quad \tau_{m2} \quad \tau_{m3} \quad \tau_{m4})^T$	vecteur des tensions des câbles au niveau des actionneurs.
$\mathbf{F}_{mv}$	matrice des coefficients de frottement visqueux.
$\mathbf{f}_{ms}$	vecteur des coefficients de frottement sec.

Entre la structure du robot et les actionneurs, les câbles sont modélisés comme des ressorts. La tension dans câble est considérée comme identique sur ses deux côtés :

$$\boldsymbol{\tau}_m = \boldsymbol{\tau}_s = \mathbf{K}_c \left(\boldsymbol{\Delta}\mathbf{q} - \mathbf{q}_m \right) \tag{B.5}$$

avec :

$\mathbf{K}_c = k_c \mathbf{I}_4$	matrice de raideurs des câbles.
$\mathbf{q}_m$	vecteur de déplacement des câbles au niveau des actionneurs.
$\boldsymbol{\Delta}\mathbf{q}$	vecteur de déplacement des câbles au niveau de la plate-forme.

À partir de la transformée de Laplace des équations (B.1), (B.4) et (B.5), la représentation sous forme schéma-blocs du modèle du robot est établie, comme le montre la figure B.3.

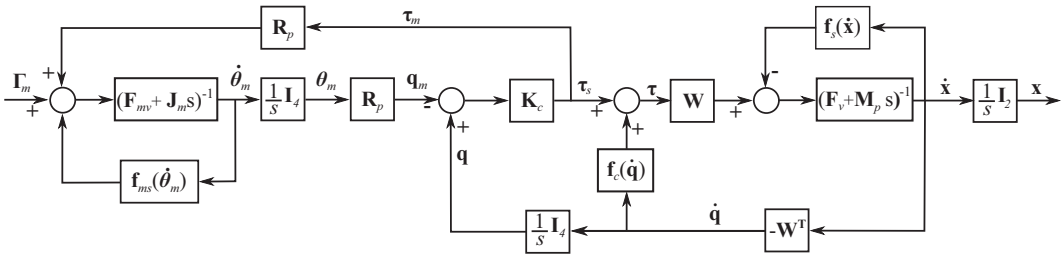

FIGURE B.3 – Schéma bloc représentant le modèle complet du robot.

Mise sous forme d'état

La linéarisation du modèle dynamique est établie autour de l'origine O du repère $\mathbb{R}_0$. Ce point représente le centre de l'espace de travail. Les termes de frottement sec $\mathbf{f}_c$, $\mathbf{f}_s$ et $\mathbf{f}_{ms}$. des équations (B.1) et (B.4) présentent en fait un comportement fortement non linéaire et ne sont pas pris en considération dans la linéarisation.

Soit la variable d'état $\boldsymbol{\zeta} = \left(\dot{\boldsymbol{\theta}}_m \quad \boldsymbol{\theta}_m \quad \dot{\mathbf{x}} \quad \mathbf{x} \right)^T$. Après la linéarisation de l'équation dynamique du robot (B.1), on obtient :

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{M}_p^{-1} \left(\mathbf{W}_o \boldsymbol{\tau} - \mathbf{F}_v \dot{\mathbf{x}} \right) \tag{B.6}$$

avec $\mathbf{W}_o$ la matrice des torseurs unitaires linéarisée autour de l'origine :

$$\mathbf{W}_o = \begin{pmatrix} -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -\sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} & -\sqrt{2} \end{pmatrix} \tag{B.7}$$

Puisque le terme $\mathbf{f}_c$ n'est pas pris en compte dans la linéarisation, la tension $\boldsymbol{\tau}$ des câbles au niveau de la plate-forme est exprimée d'après (B.5) par :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_c \left(\mathbf{q} - \mathbf{q}_m\right) \tag{B.8}$$

Ce vecteur de tension doit être exprimé en fonction de la variable d'état. Pour y arriver, le vecteur $\mathbf{q}$ peut être exprimé en utilisant le modèle cinématique, dans le cas linéarisé :

$$\mathscr{L}\left\{\mathbf{q}\right\} = \frac{1}{s}\mathscr{L}\left\{\dot{\mathbf{q}}\right\} = -\frac{1}{s}\mathbf{W}_o^T \mathscr{L}\left\{\dot{\mathbf{x}}\right\} \tag{B.9}$$

soit :

$$\mathbf{q} = -\mathbf{W}_o^T \mathbf{x} \tag{B.10}$$

Pour établir une représentation d'état du système, le modèle dynamique de la plate-forme et celui de l'actionneur doivent être exprimés en fonction de la variable d'état. Pour y parvenir, on développe (B.6) en utilisant les équations (B.8) et (B.10). Comme $\mathbf{q}_m = \mathrm{R}_p \boldsymbol{\theta}_m$, le modèle dynamique linéaire de la plate-forme est exprimé par :

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{M}_p^{-1}\left(-\mathbf{W}_o \mathbf{K}_c \left(\mathbf{W}_o^T \mathbf{x} + \mathrm{R}_p \boldsymbol{\theta}_m\right) - \mathbf{F}_v \dot{\mathbf{x}}\right) \tag{B.11}$$

et celui de l'actionneur par :

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m = -\mathbf{J}_m^{-1}\left(\mathrm{R}_p \mathbf{K}_c \mathrm{R}_p \boldsymbol{\theta}_m + \mathbf{F}_{mv} \dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathrm{R}_p \mathbf{K}_c \mathbf{W}_o^T \mathbf{x} + \boldsymbol{\Gamma}_m\right) \tag{B.12}$$

La représentation d'état du système dynamique est alors donnée par :

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\zeta}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\zeta} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Gamma}_m \\ \boldsymbol{\nu} = \mathbf{C}\boldsymbol{\zeta} \end{cases} \tag{B.13}$$

avec :

$$\boldsymbol{\nu} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \mathbf{x} \end{pmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} -\mathbf{K}_c \mathbf{R}_p & \mathbf{0}_{4\times4} & -\mathbf{K}_c \mathbf{W}_o^T & \mathbf{0}_{4\times2} \\ \mathbf{0}_{2\times4} & \mathbf{0}_{2\times4} & \mathbf{1}_{2\times2} & \mathbf{0}_{2\times2} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{4\times4} & \mathbf{1}_{4\times4} & \mathbf{0}_{4\times2} & \mathbf{0}_{4\times2} \\ -\mathbf{J}_m^{-1}\mathrm{R}_p\mathbf{K}_c\mathrm{R}_p & -\mathbf{J}_m^{-1}\mathbf{F}_{mv} & -\mathbf{J}_m^{-1}\mathrm{R}_p\mathbf{K}_c\mathbf{W}_o^T & \mathbf{0}_{4\times2} \\ \mathbf{0}_{2\times4} & \mathbf{0}_{2\times4} & \mathbf{0}_{2\times2} & \mathbf{1}_{2\times2} \\ -\mathbf{M}_p^{-1}\mathbf{W}_o\mathbf{K}_c\mathrm{R}_p & \mathbf{0}_{2\times4} & -\mathbf{M}_p^{-1}\mathbf{W}_o\mathbf{K}_c\mathbf{W}_o^T & -\mathbf{M}_p^{-1}\mathbf{F}_v \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{4\times4} \\ \mathbf{J}_m^{-1} \\ \mathbf{0}_{2\times4} \\ \mathbf{0}_{2\times4} \end{pmatrix}$$

Cette équation, qui n'a pas été exploitée par manque de temps servira dans des travaux ultérieurs (cf perspectives) à l'identification multivariable du modèle du système.

Références

[Albus 1992] J. Albus, R. Bostelman et N. Dagalakis. *"The NIST Robocrane"*. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, pages 373–385, 1992.

[BIA 2012] *"http://www.ti3.tu-harburg.de/Software/PROFILEnglisch.html"*. Consulté en 2012.

[Bosscher 2006] P. Bosscher, A.T. Riechel et I. Ebert-Uphoff. *"Wrench-feasible workspace generation for cable-driven robots"*. IEEE Transactions on Robotics, pages 890–902, 2006.

[Bouchard 2008a] S. Bouchard, C.M. Gosselin et B. Moore. *"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, pages 47–58, 2008.

[Bouchard 2008b] Samuel Bouchard. *"Géometrie des robots parallèles entraînes par des câbles"*. Thèse de doctorat, 2008.

[Chablat 1998] D. Chablat et P. Wenger. *"Moveability and Collision Analysis For Fully-Parallel Manipulators"*. In 12th CISM-IFTOMM Symposium, pages 61–68, 1998.

[Chinzei 2001] K. Chinzei et Karol Miller. *"MRI Guided Surgical Robot"*. In Australian Conference on Robotics and Automation, pages 50–55, 2001.

[Diao 2007] Xiumin Diao et Ou Ma. *"A method of verifying force-closure condition for general cable manipulators with seven cables"*. Mechanism and Machine Theory, pages 1563 – 1576, 2007.

[Ebert-Uphoff 2004] I. Ebert-Uphoff et P.A. Voglewede. *"On the Connections between Cable-Driven Robots, Parallel Manipulators and Grasping"*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 4521–4526, 2004.

[Elhawary 2010] H. Elhawary, Z.T.H. Tse, M. Rea, A. Zivanovic, B. Davies, C. Besant, N. de Souza, D. McRobbie, I. Young et M. Lamperth. *"Robotic System for Transrectal Biopsy of the Prostate : Real-Time Guidance Under MRI"*. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, pages 78–86, 2010.

[Esteveny 2010] L. Esteveny. *Conception d'un guide d'aiguille pour la radiologie interventionnelle sous IRM*. Thèse de master, 2010.

[Fang 2004] S. Fang, D. Franitza, M. Torlo, F. Bekes et M. Hiller. *"Motion Control of a Tendon-Based Parallel Manipulator using Optimal Tension Distribution"*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, pages 561–568, 2004.

[Ferdinand 1999] P. Ferdinand. "Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg". Techniques de l'ingénieur, 1999.

[Fis 2012] *http://www.fiso.com/*, Consulté en 2012.

[Fischer 2008] G.S. Fischer, I. Iordachita, C. Csoma, J. Tokuda, S.P. DiMaio, C.M. Tempany, N. Hata et G. Fichtinger. *"MRI-Compatible Pneumatic Robot for Transperineal Prostate Needle Placement"*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, pages 295–305, 2008.

[Gallina 2001] P. Gallina, A. Rossi et R.L. Williams. *"Planar Cable-Direct-Driven Robots, Part II : Dynamics and Control"*. In Proceedings of the ASME IDETC/CIE Mechanics and Robotics Conference, 2001.

[Gangi 2010] A. Gangi, X. Buy, H. Lang, J. Garnon, B. Dillmann, L. Barbé et M. de Mathelin. *"MR image-guided percutaneous tumor cryoablation"*. 8th Interventional MRI Symposium, pages 67–69, 2010.

[Gassert 2008] R. Gassert, D. Chapuis, H. Bleuler et E. Burdet. *"Sensors for Applications in Magnetic Resonance Environments"*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, pages 335–344, 2008.

[Glo 2012] *"http://globocan.iarc.fr"*. Consulté en 2012.

[Goldenberg 2008] A.A. Goldenberg, J. Trachtenberg, W. Kucharczyk, Yang Yi, M. Haider, L. Ma, R. Weersink et C. Raoufi. *"Robotic System for Closed-Bore MRI-Guided Prostatic Interventions"*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, pages 374 –379, 2008.

[Gosselin 1990] C. Gosselin. *"Determination of the workspace of 6-DOF parallel manipulators"*. Journal of mechanical design, pages 331–336, 1990.

[Gouttefarde 2006] M. Gouttefarde et C.M. Gosselin. *"Analysis of the Wrench-Closure Workspace of Planar Parallel Cable-Driven Mechanisms"*. IEEE Transactions on Robotics, pages 434–445, 2006.

[Gouttefarde 2007] M. Gouttefarde, J. P. Merlet et D. Daney. *"Wrench-Feasible Workspace of Parallel Cable-Driven Mechanisms"*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1492–1497, 2007.

[Gouttefarde 2008] M. Gouttefarde, S. Krut, O. Company, F. Pierrot et N. Ramdani. *"On the Design of Fully Constrained Parallel Cable-Driven Robots"*. In Advances in Robot Kinematics : Analysis and Design, pages 71–78. 2008.

[Gouttefarde 2011] M. Gouttefarde, D. Daney et J. P. Merlet. *"Interval-Analysis-Based Determination of the Wrench-Feasible Workspace of Parallel Cable-Driven Robots"*. IEEE Transactions on Robotics, pages 1–13, 2011.

[Hirose 1990] S. Hirose et K. Yoneda. *"Development of optical six-axial force sensor and its signal calibration considering nonlinear interference"*. In Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on, pages 46 –53 vol.1, may 1990.

[Howell 2001] L. L Howell. Compliant mechanisms. John Wiley & Sons Inc, 2001.

[Int 2012] *"http://www.ti3.tu-harburg.de/rump/intlab/"*, Consulté en 2012.

[Kawamura 1993] S. Kawamura et K. Ito. *"A New Type of Master Robot for Teleoperation using a Radial Wire Drive System"*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 55–60, 1993.

[Kawamura 1995] S. Kawamura, W. Choe, S. Tanaka et S.R. Pandian. *"Development of an Ultrahigh Speed Robot FALCON using Wire Drive System"*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 215–220, 1995.

[Kawamura 2000] S. Kawamura, H. Kino et N. Cho. *"High-speed manipulation by using parallel wire-driven robots"*. Robotica, pages 13–21, 2000.

[Kino 1999] H. Kino, C.C. Cheah, S. Yabe, S. Kawamura et S. Arimoto. *"A motion control scheme in task oriented coordinates and its robustness for parallel wire driven systems'"*. In International Conference on Advanced Robotics, pages 545–550, 1999.

[Kino 2007] H. Kino, T. Yahiro, F. Takemura et T. Morizono. *"Robust PD Control Using Adaptive Compensation for Completely Restrained Parallel-Wire Driven Robots : Translational Systems Using the Minimum Number of Wires Under Zero-Gravity Condition"*. IEEE Transactions on Robotics, pages 803–812, 2007.

[Krieger 2005] A. Krieger, R.C. Susil, C. Menard, J.A. Coleman, G. Fichtinger, E. Atalar et L.L. Whitcomb. *"Design of a Novel MRI-Compatible Manipulator for Image-Guided Prostate Interventions"*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, pages 306–313, 2005.

[Krieger 2006] A. Krieger, G. Metzger, G. Fichtinger, E. Atalar et L.L. Whitcomb. *"A Hybrid Method for 6-DOF Tracking of MRI-Compatible Robotic Interventional Devices"*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 3844–3849, 2006.

[Krieger 2010] A. Krieger, I. Iordachita, Sang-Eun Song, N.B. Cho, P. Guion, G. Fichtinger et L.L. Whitcomb. *"Development and preliminary evaluation of an actuated MRI-compatible robotic device for MRI-guided prostate intervention"*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1066–1073, 2010.

[Lafourcade 2004] Pascal Lafourcade. *"Étude de manipulateurs parallèles à câbles, conception d'une suspension active pour soufflerie.* Thèse de doctorat, 2004.

[Larson 2003] B.T. Larson, N.V. Tsekos et A.G. Erdman. *"A Robotic Device for Minimally Invasive Breast Interventions With Real-time MRI Guidance"*. In the 3rd IEEE Symposium on Bioinformatics and Bioengineering, pages 190 – 197, 2003.

[Lelong-Ferrand 2003] J. Lelong-Ferrand et J. M. Arnaudiès. Cours de mathématiques, tome 1 : Algèbre. 2003.

[Masamune 1995] K. Masamune, E. Kobayashi, Y. Masutani, M. Suzuki, T. Dohi, H. Iseki et K. Takakura. *"Development of an MR-Compatible Needle Insertion Manipulator for Stereotactic Neurosurgery"*. Journal of Image Guided Suregery, pages 242–248, 1995.

[McCullough 2005] A. R. McCullough. *"Sexual Dysfunction after Radical Prostatectomy"*. Reviews in Urology, pages 3–10, 2005.

[Melzer 2008] A. Melzer, B. Gutmann, T. Remmele, R. Wolf, A. Lukoscheck, M. Bock, H. Bardenheuer et H. Fischer. *"INNOMOTION for Percutaneous Image-Guided Interventions"*. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, pages 66–73, 2008.

[Merlet 1999] J. P. Merlet. *"Determination of 6D Workspaces of Gough-Type Parallel Manipulator and Comparison between Different Geometries"*. International Journal of Robotics Research, pages 902–916, 1999.

[Merlet 2004] J. P. Merlet. *"Analysis of the Influence of Wires Interference on the Workspace of Wire Robots"*. In Advances in Robot Kinematics, pages 211–218, 2004.

[Merlet 2006] J.P. Merlet et D. Daney. *"Legs interference checking of parallel robots over a given workspace or trajectory"*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 757 –762, 2006.

[Merlet 2009] J. P. Merlet. *"Interval Analysis for Certified Numerical Solution of Problems in Robotics"*. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., pages 399–412, 2009.

[Merlet 2010] J. P. Merlet. *"MARIONET, A Family of Modular Wire-Driven Parallel Robots"*. In Advances in Robot Kinematics, 2010.

[Mikelsons 2008] L. Mikelsons, T. Bruckmann, M. Hiller et D. Schramm. *"A Real-Time Capable Force Calculation Algorithm for Redundant Tendon-Based Parallel Manipulators"*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 3869–3874, 2008.

[Ming 1994] A. Ming et T. Higuchi. *"Study on Multiple Degree-of-Freedom Positioning Mechanism Using Wires Part I : Concept, Design and Control"*. International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, pages 235–242, 1994.

[Muntener 2008] M. Muntener, A. Patriciu, D. Petrisor, M. Schar, D. Ursu et D. Song D. Y.and Stoianovici. *"Transperineal Prostate Intervention : Robot for Fully Automated MR Imaging. System Description and Proof of Principle in a Canine Model"*. Journal of Radiology, pages 543–549, 2008.

[Ops 2012] *http://www.opsens.com/*, Consulté en 2012.

[Park 2007] Yong-Lae Park, K. Chau, R.J. Black et M.R. Cutkosky. *"Force Sensing Robot Fingers using Embedded Fiber Bragg Grating Sensors and Shape Deposition Manufacturing"*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1510–1516, 2007.

[Payne 2001] M. Payne. *"Charles Theodore Dotter : The Father of Intervention"*. Texas Heart Institute Journal, pages 28–38, 2001.

[Pham 2005] Cong Bang Pham, Guilin Yang et Song Huat Yeo. *"Dynamic Analysis of Cable-Driven Parallel Mechanisms"*. In Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pages 612–617, 2005.

[Pham 2006] Cong Bang Pham, Song Huat Yeo, Guilin Yang, Mustafa Shabbir Kurbanhusen et I-Ming Chen. *"Force-closure workspace analysis of cable-driven parallel mechanisms"*. Mechanism and Machine Theory, pages 53–69, 2006.

[Plante 2009] J.S. Plante, L. Devita, K. Tadakuma et S. Dubowsky. "MRI Compatible Device for Robotic Assisted Interventions to Prostate Cancer", chapitre 22. 2009.

[Pott 2010] A. Pott. *An Algorithm for Real-Time Forward Kinematics of Cable-Driven Parallel Robots.* In Advances in Robot Kinematics, pages 529–538. 2010.

[Rad 2012] *"https://sites.google.com/site/g4radiologie/g4/reunion-annuelle-des-g4-r"*. Consulté en 2012.

[Roberts 1998] R.G. Roberts, T. Graham et T. Lippitt. *"On the Inverse Kinematics, Statics, and Fault Tolerance of Cable-Suspended Robots"*. Journal of Robotic Systems, pages 581–597, 1998.

[Song 2010] Sang-Eun Song, N.B. Cho, G. Fischer, N. Hata, C. Tempany, G. Fichtinger et I. Iordachita. *"Development of a Pneumatic Robot for MRI-Guided Transperineal Prostate Biopsy and Brachytherapy : New Approaches"*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 2580–2585, 2010.

[Stoianovici 2007] D. Stoianovici, A. Patriciu, D. Petrisor, D. Mazilu et L. Kavoussi. *"A New Type of Motor : Pneumatic Step Motor"*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, pages 98–106, 2007.

[Stump 2006] Ethan Stump et Vijay Kumar. *"Workspaces of Cable-Actuated Parallel Manipulators"*. Journal of Mechanical Design, pages 159–167, 2006.

[Su 2009] Hao Su et G.S. Fischer. *"A 3-Axis Optical Force/Torque Sensor for Prostate Needle Placement in Magnetic Resonance Imaging Environments"*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications, pages 5–9, 2009.

[Su 2011] Hao Su, M. Zervas, G.A. Cole, C. Furlong et G.S. Fischer. *"Real-time MRI-guided needle placement robot with integrated fiber optic force sensing"*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1583–1588, 2011.

[Tsekos 2007] Nikolaos V. Tsekos, Azadeh Khanicheh, Eftychios Christoforou et Constantinos Mavroidis. *"Magnetic ResonanceâCompatible Robotic and Mechatronics Systems for Image-Guided Interventions and Rehabilitation : A Review Study"*. Annual Review of Biomedical Engineering, pages 351–387, 2007.

[Verhoeven 2004] Richard Verhoeven. *"Analysis of the Workspace of Tendon-based Stewart Platforms"*. Thèse de doctorat, 2004.

Liste des publications

Revues Internationales avec comité de lecture

[Abdelaziz 2011] S. Abdelaziz, L. Esteveny, P. Renaud, B. Bayle, L. Barbé, M. De Mathelin et A. Gangi, "*Design Considerations for a Novel MRI Compatible Manipulator for Prostate Cryoablation*", International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, pages 1-9, 2011.

Conférences internationales

[Abdelaziz 2012] S. Abdelaziz, L. Esteveny, L. Barbé, P. Renaud, B. Bayle et M. De Mathelin, "*Development of a MR-Compatible Cable-driven manipulator : Design and Technological Issues*", In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1488-1494, 2012.

[Abdelaziz 2011a] S. Abdelaziz, L. Esteveny, P. Renaud, B. Bayle et M. De Mathelin, "*Design and Optimization of a Novel MRI-compatible Wire-driven Robot for Prostate Cryoablation*", In Proceedings of the ASME IDETC/CIE Mechanisms and Robotics Conference, pages 1-10, 2011.

[Abdelaziz 2011b] S. Abdelaziz, L. Esteveny, P. Renaud, B. Bayle, L. Barbé, M. De Mathelin et A. Gangi, "Design Considerations for a Novel MRI Compatible Manipulator for Prostate Cryoablation", 25th International Congress of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2011.

[Abdelaziz 2010] S. Abdelaziz, P. Renaud, B. Bayle et M. De Mathelin, "*Combining Structural and Kinematic Analysis using Interval Analysis for a Wire-driven Manipulator*", In Advances in Robot Kinematics, pages 147-156, 2010.

Congrès National et International

[Abdelaziz 2011c] S. Abdelaziz, L. Esteveny, P. Renaud, B. Bayle et M. De Mathelin, "*Développement d'un système robotique pour la Cryothérapie de la Prostate*", 20ème Congrès Français de Mécanique, 2011.

Résumé

La réalisation de gestes percutanés dans l'IRM ouvre la voie à des pratiques médicales prometteuses. En revanche, l'utilisation de l'IRM reste à ce jour limitée, et ce malgré l'intérêt en terme de qualité d'image. Cela est dû principalement à l'étroitesse du tunnel et à la complexité des gestes réalisés. Pour rendre accessibles de telles pratiques, une assistance robotique semble très pertinente. Pour le concepteur, la réalisation d'un système robotisé compatible IRM n'est pas une tâche facile, étant donné l'espace disponible et la présence d'un champ magnétique intense. C'est dans ce contexte que nous avons développé un assistant robotique, MRGuide, dédié aux traitements du cancer de la prostate dans l'IRM. Il s'agit d'un manipulateur à câbles avec un actionnement déporté.

Dans ce travail, de nombreuses contributions menant à la réalisation de ce prototype sont présentées. Parmi celles-ci, une instrumentation originale pour estimer la tension des câbles est proposée. Cette instrumentation est basée sur l'utilisation d'une structure en treillis, de mécanismes compliants et de capteurs de déplacement à technologie optique pour assurer la compatibilité avec le scanner. Pour optimiser la géométrie du robot et faciliter son intégration dans l'IRM, une démarche de conception des robots à câbles instrumentés est développée. Cette démarche est basée sur une approche par intervalles. D'autres contributions relatives à la caractérisation de l'espace de travail des robots à câbles instrumentés, à l'étalonnage des capteurs de tension et au développement d'une stratégie de commande adaptée au dispositif sont décrites.

Abstract

Performing medical gestures under MRI is a promising medical approach. To date, using MRI for interventions is still limited, despite the quality of the provided images. This limitation is mainly due to the confined physical space inside the tunnel and the complexity of the gestures. To make accessible such practices, a robotic assistance seems very relevant. However, it's a challenge for the designer, given the limited space and the strong magnetic field inside the bore. In this context, we have developed an MR-compatible robotic assistant, named MRGuide, for prostate interventions. The robot is based on an original cable-driven manipulator with a remote actuation.

In this work, many contributions leading to the development of MRGuide are presented. One of these contributions lies in the use of an original instrumented structure to evaluate the cables tensions. This instrumentation is based on the use of a truss structure, compliant mechanisms and optical displacement sensors for MR compatibility. In order to optimize the size of the robot and facilitate its integration in the scanner, a new design methodology using interval analysis has been developed. Other contributions related to the workspace characterization of instrumented cable-driven robots, the tension sensor calibration and the development of a new control strategy adapted to the device are described.