



Télé-opération avec retour d'effort pour la chirurgie mini-invasive

Walid Zarrad

► To cite this version:

Walid Zarrad. Télé-opération avec retour d'effort pour la chirurgie mini-invasive. Automatique / Robotique. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2007. Français. NNT : . tel-00263824

HAL Id: tel-00263824

<https://theses.hal.science/tel-00263824>

Submitted on 13 Mar 2008

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.

ACADÉMIE DE MONTPELLIER
UNIVERSITÉ MONTPELLIER II
- SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC -

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ MONTPELLIER II

Discipline : Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal

Formation Doctorale : Systèmes Automatiques et Microélectronique

École Doctorale : Information, Structures et Systèmes

présentée et soutenue publiquement

par

Walid ZARRAD

le 19 décembre 2007

Titre :

**Télé-opération avec retour d'effort pour la
chirurgie mini-invasive**

JURY :

M. Olivier SENAME	Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble	<i>Président, Rapporteur</i>
M. Guillaume MOREL	Professeur à l'Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI	<i>Rapporteur</i>
M. Bernard BAYLE	Maître de Conférence à l'Univ. Louis Pasteur, Strasbourg I	<i>Examineur</i>
M. Olivier COMPANY	Maître de Conférence à l'Univ. Montpellier II	<i>Examineur</i>
M. François PIERROT	Directeur de Recherche CNRS au LIRMM, Montpellier	<i>Directeur de Thèse</i>
M. Philippe POIGNET	Professeur à l'Univ. Montpellier II	<i>Co-directeur de Thèse</i>

Remerciements

Je profite de ces quelques lignes pour remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu, encouragé et aidé à mener ces trois années de thèse dans les meilleures conditions.

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de thèse François Pierrot qui m'a accueilli dans son équipe de recherche. Son soutien, ses encouragements ainsi que sa confiance m'ont permis d'avancer dans mes travaux. Un grand merci à ce monsieur avec qui j'ai beaucoup discuté et appris pendant ces années passées au LIRMM.

Ma gratitude va également à mes deux encadrants, Olivier Company et Philippe Poinet. Je les remercie pour leurs disponibilités et leurs conseils pertinents. Chacun, à sa manière, a su m'aider et me soutenir dans les moments difficiles. Une grande reconnaissance envers ces deux messieurs avec qui s'est installé un rapport d'amitié, de respect et de confiance qui m'a été indispensable pour avancer dans mes travaux de thèse.

Je souhaite ensuite remercier M. Guillaume Morel, M. Olivier Sename et M. Bernard Bayle pour avoir accepté de juger et d'évaluer mon travail. Leurs travaux et expertises ont toujours été une référence qui m'a permis de progresser et d'orienter mes activités de recherche. J'ai été honoré de les avoir dans mon jury de thèse.

Ma reconnaissance va également à Rui Cortesão qui m'a beaucoup aidé et soutenu tout au long de ces trois années de thèse. Un grand merci à ce chercheur qui m'a transmis sa passion pour l'automatique et la robotique. Thank you very much Rui.

Je remercie également M. Michel Robert, directeur du LIRMM, qui m'a accueilli au sein du laboratoire pour y réaliser ma thèse. Je profite aussi pour remercier tout le personnel du laboratoire. Un grand merci en particulier à Céline Berger, Elisabeth Greverie, Nadine Tilloy, Cécile Lukasik, Michel Benoit et Philippe Tilloy qui sans leurs aides et disponibilités permanentes, ces trois années de thèse ne se seraient pas passées dans de si bonnes conditions.

Un grand merci à tous les membres et permanents du département robotique à commencer par son directeur actuel Philippe Fraisse. Mon aventure au LIRMM a réellement débuté lorsqu'il m'a accueilli dans son équipe de recherche pour y réaliser mon stage de DEA. Je tiens à le remercier pour son aide, ses précieux conseils et son soutien permanent tout au long de ces années. Je remercie ensuite Etienne Dombre pour ses conseils, ses remarques et son esprit critique qui m'ont aidé à progresser dans mes travaux. J'ai été honoré de travailler avec lui. Un grand merci à Olivier Strauss, René Zapata, Vincent Creuze, Jean Triboulet, Christine Azevedo, Fred Comby, André Crosnier et David Andreu avec qui j'ai beaucoup discuté et échangé des idées. J'aimerais particulièrement remercier le jeune chercheur Sebastien Krut dont l'enthousiasme, l'expertise et la passion pour la recherche m'ont toujours poussé à progresser.

J'aimerais aussi remercier les doctorants roboticiens. Un grand merci à David (mon voisin qui murmure à l'oreille de son ordinateur et qui ne mange que des "galettes" bretonnes), Vincent Bonnet (le seul camarguais à faire une thèse en robotique ! normal, c'est le neveu du big boss !), Rogério (le brésilien collectionneur de vélos), Carla (une brésilienne

adapte des ventes privées sur internet), Peter (le iPhone's geek), Mourad, Sébastien et Milan (les responsables du box IEEE), Olivier (surnommé Junior), Andréa (une roumaine à la limite de la stabilité), Kevin (un mathématicien converti à la robotique), Michel (monsieur "je vends tout" !) et Arturo (toujours en avance par rapport au planning). Merci à Aurélien (le Super Geek le plus à l'ouest que je connaisse) pour les soirées pizza passées au LIRMM et à Vincent Begoc (surnommé Belloc "comme le petit village de l'Ariège") pour ses petites anecdotes incroyables. Tenez bon, la fin est proche.

Évidemment je n'oublie pas les anciens thésards qui m'ont très bien accueilli en arrivant au LIRMM. Merci à Gaël (l'homme à mille et une blagues "à deux balles"), José (l'expert en relations amoureuses), Pierre (son accent fait de lui le maillet le plus doux au monde!), Samer (le libanais qui mangeait des sushis), Fabien (Le Mac expert). Sans vous, vos conseils et votre joie de vivre, ces années de thèse n'auraient jamais été les mêmes.

Pendant ces trois dernières années j'ai vécu une expérience humaine au cours de laquelle j'ai fait la connaissance de personnes exceptionnelles qui au fil du temps sont devenues de vrais amis. Un grand merci à la petite bande (essentiellement bretonne) qui m'a accompagné jusqu'en Tunisie pour mon mariage : Vincent Nabatch, Mickaël et Mélanie "Sauvée les Poulain" (je n'oublie évidemment pas Elise) ainsi qu'à Jean Mathias Spiewatch : Sans commentaire, juste un GRAND MERCI à vous!. Merci également à Cedric (un autre breton expatrié au pays du soleil) pour son amitié et ses interminables fous rires. J'espère vous voir tous chez moi un de ces jours. Enfin un très Grand Merci à mon amie Seyma pour sa présence, son amitié et sa joie de vivre. Mon aventure en France ne serait pas la même sans toi. Merci pour tout.

Je termine par l'expression de ma plus grande gratitude envers ma famille. D'abord mes grands parents et mes deux soeurs Meriem et Nedia (et son mari "moitié breton" Mehdi) pour leur présence, leur écoute et leur soutien permanent. Ensuite, mes parents qui m'ont toujours encouragé, aidé et soutenu. Je leur suis extrêmement reconnaissant pour tout ce qu'ils m'ont apporté. Enfin, je termine en remerciant celle qui sans sa présence, son écoute, sa patience et son aide, je ne serais sans doute pas là. Merci à ma femme Nadia pour tout le bonheur qu'elle m'apporte chaque jour.

Table des matières

Introduction Générale	1
1 La robotique médicale et les systèmes de télé-opération	3
1.1 L'intervention chirurgicale et l'assistance robotique	3
1.1.1 L'intervention chirurgicale	4
1.1.1.1 La chirurgie mini-invasive	4
1.1.1.2 Limitations de la chirurgie mini-invasive	7
1.1.1.3 Vers une assistance robotique	8
1.1.2 La robotique médicale	9
1.1.2.1 Les systèmes existants	9
1.1.2.2 Autonomie et degré d'interaction	12
1.1.2.3 Conclusion	15
1.1.3 Les limitations des systèmes télé-opérés	16
1.1.3.1 La chirurgie mini-invasive et le toucher	16
1.1.3.2 La chirurgie mini-invasive et le cœur battant	17
1.1.3.3 Vers des systèmes télé-opérés avec retour en effort	17
1.2 Télé-opération avec retour d'effort	17
1.2.1 Présentation générale	18
1.2.1.1 Définitions	18
1.2.1.2 Caractéristiques	19
1.2.1.3 Représentation	20
1.2.2 Différentes architectures	20
1.2.2.1 Architectures de télé-opération	21
1.2.2.2 Discussion	23
1.2.3 Analyse des systèmes de télé-opération	24
1.2.3.1 Stabilité	24
1.2.3.2 Transparence	26
1.2.3.3 Le compromis Stabilité/Transparence	27
1.3 Contributions	27
2 Télé-opération et commande en effort d'un robot d'assistance au geste chirurgical	29
2.1 Introduction	29
2.2 La chirurgie mini-invasive et le retour d'effort	30
2.3 Architecture de télé-opération avec retour d'effort	32
2.3.1 Schéma global de télé-opération	32
2.3.2 Commande en effort du système esclave	33
2.3.2.1 Modélisation du site distant	33

2.3.2.2	Synthèse de la commande par retour d'état	37
2.3.2.3	Observateur actif de l'état	39
2.3.3	Synthèse du schéma global de télé-opération	43
2.4	Analyse expérimentale	43
2.4.1	Plate-forme expérimentale	43
2.4.2	Résultats expérimentaux	44
2.4.2.1	Déplacement en espace libre	46
2.4.2.2	Interaction avec un objet mou	49
2.4.2.3	Interaction avec un objet de rigidité moyenne	50
2.5	Conclusion	51
3	Transparence et stabilité du schéma de télé-opération	55
3.1	Introduction	55
3.2	Estimation de la raideur de l'environnement et commande adaptative . . .	56
3.2.1	Stratégies d'estimation paramétrique	56
3.2.2	Filtre de Kalman étendu pour l'estimation de la raideur	58
3.2.2.1	Estimation d'un paramètre inconnu par un filtre de Kalman étendu	58
3.2.2.2	Adaptation de la stratégie de commande	60
3.2.2.3	Validation expérimentale de la commande adaptative . . .	61
3.2.3	Compensation des erreurs de modélisation	63
3.2.3.1	Représentation et compensation des erreurs de modélisation	63
3.2.3.2	Estimation de l'état en position	64
3.2.3.3	Validation expérimentale de la commande adaptative avec prise en compte des erreurs de modélisation	65
3.2.4	Télé-opération et estimation en ligne de la raideur de l'environnement	67
3.2.5	Conclusion	67
3.3	Transparence et stabilité du schéma de télé-opération	69
3.3.1	Transparence du schéma de télé-opération	69
3.3.2	Stabilité du schéma de télé-opération	73
3.3.3	Compromis stabilité/transparence et commande adaptative	76
3.4	Télé-opération et interaction avec des tissus <i>ex-vivo</i>	80
3.4.1	Interaction avec des tissus <i>ex-vivo</i>	80
3.4.2	Insertion d'aiguille télé-opérée	84
3.5	Conclusion	88
4	Vers la chirurgie mini-invasive à cœur battant	91
4.1	Introduction	91
4.2	Chirurgie mini-invasive et passage par le trocart	92
4.2.1	Les solutions existantes	92
4.2.1.1	La cinématique contrainte	92
4.2.1.2	La commande contrainte	93
4.2.2	Commande par découplage dynamique	94
4.2.2.1	Découplage Tâche-Posture	94
4.2.2.2	Télé-opération et commande dynamique de l'organe terminal	95
4.2.2.3	Gestion de la contrainte du trocart	96
4.2.3	Analyse expérimentale	100
4.3	Vers la compensation des mouvements physiologiques	107
4.3.1	Assistance en chirurgie cardiaque	107

4.3.2	La commande en effort et le rejet de perturbations périodiques . . .	108
4.3.3	Rejet de perturbations périodiques en effort	109
4.3.3.1	Estimation des perturbations en effort	110
4.3.3.2	Compensation des perturbations	112
4.3.3.3	Synthèse de la commande référencée modèle	114
4.3.4	Analyses expérimentales	114
4.4	Conclusion	116
Conclusion Générale		121
Publications		125
Bibliographie		127
A Modèle géométrique et dynamique du robot D2M2		139

Table des figures

1.1	Principe de la chirurgie mini-invasive	5
1.2	Circulation extra-corporelle	6
1.3	Stabilisateur mécanique OctopusTM (Medtronic Inc)	7
1.4	Position de l'équipe chirurgicale effectuant une intervention mini-invasive .	8
1.5	Le robot télé-opéré Da VinciTM dédié à la chirurgie mini-invasive	14
1.6	La plate-forme The Black Falcon dédiée à la chirurgie mini-invasive télé-opérée	15
1.7	Système robotique télé-opéré dédié à la chirurgie mini-invasive MC²E . . .	16
1.8	Interfaces haptiques à architecture série et parallèle	18
1.9	Système de télé-opération	19
1.10	Aperçu des schémas de télé-opération proposés	22
2.1	Architectures de télé-opération dédiées à la chirurgie mini-invasive	31
2.2	Schéma de télé-opération position - position intégrant une commande en effort du robot esclave	32
2.3	Commande dynamique et système linéarisé pour chaque direction opérationnelle	35
2.4	Stratégie de commande d'estimation et de commande par retour d'état estimé	41
2.5	Architecture de télé-opération et stratégie de commande en effort intégrant un AOB et une commande par retour d'état	42
2.6	Représentation schématique de la plate-forme expérimentale	43
2.7	Plate-forme expérimentale	44
2.8	Suivi en position d'une trajectoire en espace libre imposée par l'opérateur .	46
2.9	Efforts mesurés, estimés et désirés lors d'une télé-opération en espace libre	47
2.10	L'état actif estimé et la commande par retour d'état lors d'une télé-opération en espace libre	48
2.11	Erreurs de poursuite lors d'une télé-opération en espace libre	48
2.12	Suivi en position d'une trajectoire imposée par l'opérateur lors d'une télé-opération et prise de contact avec un objet mou	50
2.13	Efforts mesuré, estimé et désiré lors d'une télé-opération et prise de contact avec un objet mou	51
2.14	L'état actif estimé et la commande par retour d'état lors d'une télé-opération et prise de contact avec un objet mou	52
2.15	Les efforts, les positions et la commande lors d'une télé-opération et prise de contact avec un objet de rigidité moyenne	53
3.1	Architecture de télé-opération, stratégie de commande adaptative en effort et estimation en ligne de la raideur de l'environnement	60

3.2	Commande en effort du robot avec une estimation en ligne de la raideur de l'environnement	62
3.3	Commande en effort du robot avec une estimation en ligne de la raideur de l'environnement et la prise en compte des erreurs de modélisation	66
3.4	Suivi en position d'une trajectoire imposée par l'opérateur lors d'une télé-opération avec estimation en ligne de la raideur de l'environnement et compensation des erreurs de modélisation	68
3.5	Efforts mesuré, estimé et désiré lors d'une télé-opération avec estimation en ligne de la raideur de l'environnement et compensation des erreurs de modélisation	69
3.6	Estimation en ligne de la raideur de l'environnement lors d'une prise de contact avec des objets de rigidité différente	70
3.7	Schéma de télé-opération position - position avec commande en effort et stratégie d'estimation de la raideur de l'environnement	71
3.8	Réponse fréquentielle de l'impédance transmise à l'opérateur comparée à celle désirée pour différentes valeurs de la raideur de l'environnement	73
3.9	Schéma de télé-opération avec retour en effort faisant apparaître la position volontaire et involontaire de la station maître	74
3.10	Réponse fréquentielle des différents systèmes constituant le schéma de télé-opération en boucle ouverte reliant la position volontaire de l'opérateur à la position du robot esclave	75
3.11	Réponse fréquentielle du sous-système H_2 constituant le système en boucle ouverte H reliant la position volontaire de l'opérateur à celle du robot esclave pour différentes valeurs de la raideur virtuelle K_v	76
3.12	Efforts, positions et raideurs lors d'une télé-opération avec estimation en ligne de la raideur de l'environnement et adaptation de la raideur virtuelle selon une loi linéaire en fonction de la raideur nominale estimée	78
3.13	Evolution de la raideur virtuelle en fonction de la raideur nominale estimée de l'environnement.	78
3.14	Réponse fréquentielle dans le plan de Black illustrant les marges de stabilité du système reliant la position volontaire de l'opérateur à celle du robot esclave pour différentes valeurs de la raideur de l'environnement et en réalisant une adaptation de la raideur virtuelle selon une loi sigmoïde en fonction de la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$	79
3.15	Réponse fréquentielle de l'impédance transmise à l'opérateur comparée à celle désirée pour différentes valeurs de la raideur de l'environnement et en réalisant une adaptation de la raideur virtuelle	80
3.16	Efforts, positions et raideurs lors d'une télé-opération avec estimation en ligne de la raideur de l'environnement et adaptation de la raideur virtuelle selon une loi sigmoïde en fonction de la raideur nominale estimée	81
3.17	Environnement composé de tissus <i>ex-vivo</i>	82
3.18	Télé-opération et prise de contact avec un tissu <i>ex-vivo</i> sans une estimation en ligne de la raideur de l'environnement	82
3.19	Efforts, positions et raideurs lors d'une télé-opération et interaction avec des tissus <i>ex-vivo</i> de rigidité différente avec estimation en ligne de la raideur de l'environnement et adaptation de la raideur virtuelle	83
3.20	Les différentes phases d'insertion d'une aiguille dans un tissu <i>ex-vivo</i>	85

3.21	Télé-opération et insertion d'une aiguille dans un tissu <i>ex-vivo</i> sans considérer la stratégie d'estimation en ligne de la raideur du tissu	86
3.22	Télé-opération et insertion d'une aiguille dans un tissu <i>ex-vivo</i> avec une estimation en ligne de la raideur du tissu et adaptation de la raideur virtuelle	87
4.1	Principe de la commande de l'espace contraint pour le respect du passage par un point fixe	94
4.2	Schéma de principe de la commande de l'espace contraint	95
4.3	Définition d'un robot virtuel pour la commande de l'espace contraint et le respect du passage par un point fixe	97
4.4	Architecture de commande en position dans l'espace contraint	99
4.5	Plate-forme expérimentale et simulateur pour le passage par un point fixe	100
4.6	Suivi en position avec prise en compte du passage par le point fixe d'une trajectoire en espace libre imposée par l'opérateur	102
4.7	Erreurs de poursuite lors d'une télé-opération en espace libre avec prise en compte du passage par le point fixe	102
4.8	Efforts estimés et désirés lors d'une télé-opération en espace libre avec prise en compte du passage par le point fixe	103
4.9	L'état actif estimé et la commande par retour d'état lors d'une télé-opération en espace libre avec prise en compte du passage par le point fixe	103
4.10	Respect du passage par le point fixe	104
4.11	Positions désirées, mesurées et estimées du robot virtuel pour la prise en compte du passage par le point fixe	105
4.12	L'état actif estimé et la commande par retour d'état appliquée au robot virtuel pour la prise en compte du passage par le point fixe	105
4.13	Couples dédiés à la tâche, à l'espace contraint et à la posture appliqués lors d'une télé-opération dans un espace libre avec prise en compte du passage par le point fixe	106
4.14	Rejet de perturbations périodiques en effort par l'architecture de commande par estimation et retour d'état	109
4.15	Architecture de commande en effort intégrant la commande par estimation et retour d'état, l'estimation en ligne de la raideur de l'environnement et une compensation de perturbations périodiques de sortie	110
4.16	Estimation des perturbations périodiques en effort par l'algorithme d'identification harmonique	112
4.17	Rejet de perturbations périodiques en effort par une première approche de compensation	113
4.18	Architecture de commande en effort intégrant la commande par estimation et retour d'état, l'estimation en ligne de la raideur de l'environnement et l'estimation et la compensation de perturbations périodiques en effort	115
4.19	Raideurs estimées et déplacements du simulateur de mouvement lors d'une compensation de perturbations périodiques en effort	116
4.20	Rejet de perturbations périodiques en effort par l'architecture de commande	117
4.21	Perturbations estimées lors d'une compensation de perturbations en efforts	118
A.1	Cinématique du robot D2M2	139

Liste des tableaux

2.1	Paramètres de modélisation, d'estimation et de commande par retour d'état	45
3.1	Paramètres pour l'estimation de la raideur de l'environnement	61
4.1	Paramètres d'estimation et de commande par retour d'état pour une télé- opération avec prise en compte du passage par un point fixe	100
4.2	Paramètres d'estimation et de commande par retour d'état de l'espace contraint	101
A.1	Table de Denavit-Hartenberg du robot D2M2	140
A.2	Paramètres dynamiques du robot D2M2	141

Introduction Générale

Les évolutions technologiques majeures de la deuxième moitié du XX^{ième} siècle ainsi que les développements importants des outils informatiques ont permis l'évolution des systèmes robotiques du milieu industriel vers d'autres domaines d'activité plus sensibles tel que le médical. L'apparition des robots dans les blocs opératoires date des années 1980. Avec les progrès considérables de l'acte chirurgical d'un côté et des techniques d'imagerie médicale de l'autre, ces systèmes ont pu utiliser toutes les ressources nécessaires pour apporter aux chirurgiens une assistance, une précision et une fiabilité accrues face à des situations complexes et délicates nécessitant une grande agilité. Le développement des systèmes robotiques dans le monde médical apparaît nettement en quelques dates phares selon les disciplines : d'abord pour la neurochirurgie avec l'utilisation d'un robot industriel en 1985 suivi de la première intervention neurochirurgicale sur un patient en 1989, ensuite pour la chirurgie orthopédique et la première intervention pour une prothèse de hanche en 1992 et finalement en 1994 avec la première autorisation pour l'utilisation d'un bras porte-endoscope en chirurgie mini-invasive.

Avec la découverte de l'anesthésie et de l'asepsie, le geste mini-invasif a été une nouvelle révolution dans le domaine chirurgical. Initialement, la chirurgie qui consiste à pratiquer le soin par l'usage de la main à la suite d'un échec thérapeutique, a pendant plusieurs décennies nécessité une large incision, garante d'un soin effectué dans les meilleures conditions. Les interventions étaient traumatisantes et contraignantes pour le patient avec des risques de complication accrus en phase per-opératoire (infection, saignement, délabrement tissulaire important, ...) et des effets secondaires indésirables en phase post-opératoire (douleur, temps de récupération, ...). Avec l'apparition de l'acte mini-invasif en 1940, les incisions sont devenues beaucoup plus petites (de l'ordre de deux centimètres) rendant ainsi les interventions chirurgicales beaucoup plus confortables pour le patient. L'utilisation d'une caméra et d'une instrumentation dédiée, a permis au chirurgien de manipuler, de l'extérieur, des instruments se trouvant à l'intérieur du corps du patient.

Si l'acte mini-invasif est d'un apport indéniable pour le patient, il a pendant plusieurs années compliqué le travail du chirurgien. Les petites incisions imposées par cette pratique ont non seulement limité sa visibilité autour des organes à traiter (transmission vidéo) mais aussi et surtout ses capacités gestuelles et sensorielles. La première assistance robotique, apportée en 1994 avec le robot porte endoscope **Aesop**, a ouvert de nouvelles perspectives faisant naître les systèmes télé-opérés, tels le **Zeus** ou le **Da Vinci**, au sein des blocs opératoires. Ces innovations technologiques ont offert au chirurgien la possibilité de retrouver les conditions d'une chirurgie ouverte et des solutions pour accroître la qualité de ses gestes.

Néanmoins, les problèmes liés aux systèmes télé-opérés dédiés à l'assistance en chirurgie mini-invasive sont encore nombreux à résoudre avant d'obtenir des performances pleinement satisfaisantes au sens de la pratique (retour sensoriel, compensation des mouvements physiologiques, ...). Un des objectifs principaux des travaux de recherche en

robotique chirurgicale est alors d'apporter des solutions pour augmenter la qualité du geste du chirurgien en améliorant sa perception au travers un retour des efforts appliqués.

Dans ce contexte, ce manuscrit présente nos contributions dans le domaine de la chirurgie mini-invasive avec le développement d'une architecture de télé-opération avec retour d'effort. Elles ont pour objectif principal améliorer la perception du chirurgien lors d'une intervention chirurgicale mini-invasive. La suite de ce manuscrit est organisée de la façon suivante :

- † Le chapitre 1 introduit le contexte général de ces travaux à savoir la chirurgie mini-invasive télé-opérée et les systèmes à retour d'effort. Nous détaillerons alors l'acte mini-invasif avant de présenter la robotique médicale. Nous porterons une attention particulière aux systèmes télé-opérés et nous mettrons en avant l'intérêt du retour d'effort dans le contexte de la chirurgie mini-invasive. Nous finirons ce chapitre en proposant un état de l'art des systèmes de télé-opération intégrant un retour d'effort. Nous détaillerons les architectures les plus utilisées et nous préciserons les différents critères de performances.
- † Le chapitre 2 décrit la conception d'une architecture de télé-opération avec retour d'effort dédiée à l'assistance au geste chirurgical mini-invasif. Nous détaillerons l'architecture de télé-opération ainsi que la stratégie de commande choisies. Nous présenterons ensuite la plate-forme robotique sur laquelle l'architecture sera évaluée. A travers les résultats expérimentaux, nous analyserons les performances et les limitations de cette architecture. Nous montrerons que ces limitations sont principalement liées à la connaissance des caractéristiques de l'environnement.
- † Le chapitre 3 présente une analyse de la stabilité et la transparence du schéma proposé de télé-opération avec retour d'effort. Nous développerons une stratégie d'estimation en ligne de la raideur de l'environnement pour pallier les limitations présentées au Chapitre 2. Nous nous intéresserons ensuite à la stabilité et à la transparence de l'architecture de télé-opération. Une commande adaptative sera alors proposée et validée sur la plate-forme expérimentale. Nous conclurons par des évaluations expérimentales en considérant un environnement constitué de tissus *ex-vivo*. Nous nous intéresserons à une interaction simple avec des tissus de rigidité différente et à une insertion d'aiguille télé-opérée dans un tissu mou.
- † Enfin dans le chapitre 4, nous nous intéresserons à deux contraintes majeures posées par la chirurgie mini-invasive. La première est le passage des instruments chirurgicaux par le trocart. Cette contrainte sera traitée directement dans l'architecture de commande du système de télé-opération avec retour d'effort. La deuxième contrainte est la compensation des mouvements physiologiques lors d'une intervention mini-invasive cardiaque. Ainsi, nous présenterons une stratégie de commande capable de compenser les perturbations dans les efforts appliqués par l'instrument sur un environnement en mouvement. Les solutions proposées seront évaluées sur notre plate-forme.
- † Nous conclurons ce manuscrit par une synthèse des différentes contributions apportées et par une présentation de nos perspectives dans le contexte de la chirurgie mini-invasive télé-opérée avec retour d'effort.

Chapitre 1

La robotique médicale et les systèmes de télé-opération

Sommaire

1.1	L'intervention chirurgicale et l'assistance robotique	3
1.1.1	L'intervention chirurgicale	4
1.1.2	La robotique médicale	9
1.1.3	Les limitations des systèmes télé-opérés	16
1.2	Télé-opération avec retour d'effort	17
1.2.1	Présentation générale	18
1.2.2	Différentes architectures	20
1.2.3	Analyse des systèmes de télé-opération	24
1.3	Contributions	27

1.1 L'intervention chirurgicale et l'assistance robotique

La pratique de la chirurgie existe depuis la préhistoire et a considérablement évolué au fil du temps. Cependant, elle a bien souvent été reléguée à une classe inférieure du monde médical ce qui lui a causé une évolution inégale dans le temps. Les plus grands progrès de cette pratique n'ont pu être constatés qu'avec l'approfondissement progressif des connaissances en anatomie humaine et récemment avec la découverte de l'anesthésie et l'asepsie.

Dans le cadre de ce travail, notre intérêt s'est porté sur le développement de la chirurgie bénéficiant des avancées technologiques. D'un côté, nous nous sommes intéressés au développement de nouvelles procédures chirurgicales, avec l'apparition de la chirurgie mini-invasive et d'un autre côté à celui de l'aide au geste, avec l'apparition de l'assistance informatique et surtout robotique. Ainsi, la présentation que nous proposons dans la suite, concerne tout d'abord l'intervention chirurgicale et l'évolution de l'acte classique vers le geste mini-invasif. Nous nous intéresserons en particulier à l'acte chirurgical cardiaque qui, comme nous l'expliquerons, présente des contraintes supplémentaires par rapport aux autres interventions. Nous exposerons ensuite l'assistance robotique dans le milieu médical avec un état de l'art des solutions proposées et développées. Nous discuterons enfin de l'apport et des limitations des systèmes robotiques par rapport à la pratique de la chirurgie mini-invasive en général et cardiaque en particulier.

1.1.1 L'intervention chirurgicale

Hormis les cas les plus graves où la chirurgie est prescrite dès le diagnostic fait, dans la majorité des cas, l'acte chirurgical s'impose suite à l'échec du traitement médical. La chirurgie se définit alors comme une partie de la médecine qui propose la guérison par l'usage de la main (du grec *cheira*, main). Néanmoins, avec les différentes avancées technologiques (système d'imagerie, matériel chirurgical, ...), la procédure a beaucoup évolué donnant naissance à des techniques chirurgicales beaucoup moins invasives. À travers une présentation de l'acte chirurgical mini-invasif et son application en chirurgie cardiaque, nous exposerons l'apport possible de la robotique pour pallier les problèmes posés par la pratique.

1.1.1.1 La chirurgie mini-invasive

L'un des plus important progrès concernant la pratique de la chirurgie est l'apparition des techniques d'intervention à invasion minimale. Que l'acte mini-invasif soit appliqué lors d'une intervention chirurgicale en général ou cardiaque en particulier, il s'impose comme une solution pour le confort du patient.

D'une voie classique à une voie mini-invasive

Les interventions chirurgicales servent en général à réparer un traumatisme grave, à soigner une infection, extraire une structure pathologique, libérer un organe comprimé ou encore à corriger une malformation. Ces interventions consistent alors à atteindre un organe à traiter après incision sur un patient anesthésié en milieu stérile. Ainsi, lors d'une intervention, le chirurgien doit accéder librement aux tissus et organes parfois profonds situés dans le corps du patient. Il procède alors, selon les méthodes classiques, à une voie d'abord par une large incision et un dégagement du site. Cette voie d'abord large favorise l'acte chirurgical en offrant au chirurgien une meilleure exposition du champ opératoire, un grand espace de travail et surtout en lui permettant d'utiliser toutes ses capacités sensorielles pour réaliser son geste.

Quels que soient le traumatisme, l'infection, la pathologie, etc ..., le recours à la chirurgie s'avère très lourd pour le patient. Une intervention classique nécessite une ouverture pour accéder à l'organe malade et peut malheureusement causer des dommages parfois d'ordre plus élevé que l'opération curative. Avec un risque d'infection, des saignements importants et un grand délabrement tissulaire, les grandes incisions réalisées par le chirurgien, augmentent les risques de complication pendant l'intervention. En phase post-opératoire, elles provoquent des effets secondaires indésirables chez le patient avec des douleurs importantes, un temps de récupération long et un aspect esthétique la plupart du temps très gênant pour le patient.

C'est donc pour une voie d'abord plus respectueuse du patient, qu'est apparue, depuis plusieurs années, une nouvelle technique de chirurgie : la chirurgie mini-invasive (minimally invasive surgery, MIS). En limitant la taille de la voie d'abord, cette technique s'impose progressivement comme une nécessité pour réduire le traumatisme chirurgical chez les patients. Notamment utilisée en chirurgie de l'appareil digestif et en chirurgie cardiaque, elle impose la réalisation de petites incisions (de l'ordre de 1 à 2 [cm]) et l'utilisation d'instruments chirurgicaux spécifiquement conçus. Ainsi illustré sur la Figure 1.1, le chirurgien procède à l'incision de quelques petites ouvertures. Sur chacune des incisions, il met en place un trocart à travers lequel il peut introduire un instrument chirurgical. En

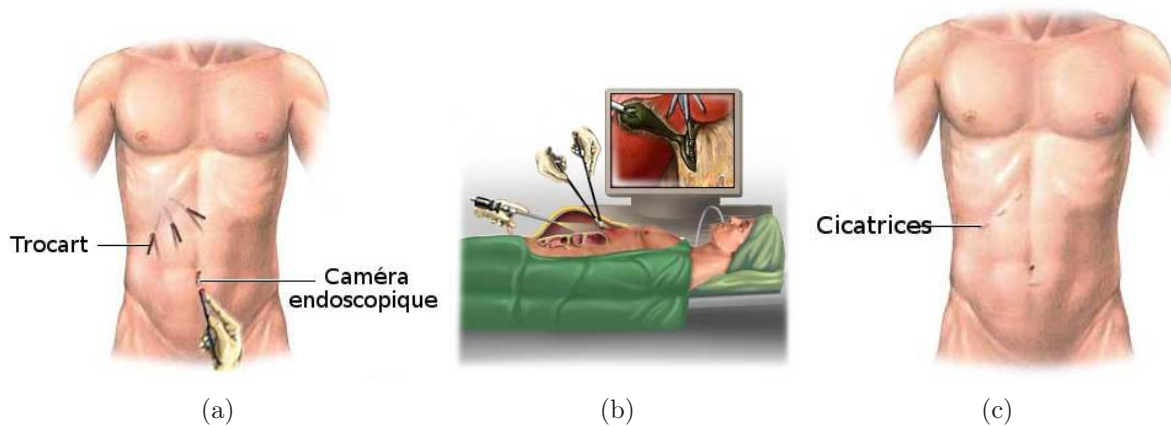


Figure 1.1 - *Principe de la chirurgie mini-invasive : (a) vue extérieure de l'emplacement et de la taille des incisions, (b) manipulation des instruments chirurgicaux et image perçue sur le moniteur vidéo et (c) taille des cicatrices en phase post-opératoire* (source : Health Library Encyclopedia, changement de la légende en français).

chirurgie abdominale, le chirurgien augmente l'espace de travail en injectant du gaz carbonique à travers l'un des trocarts. Il introduit ensuite une caméra endoscopique connectée à un moniteur vidéo puis deux instruments. Ces derniers, dédiés à la chirurgie mini-invasive, sont en forme de tige de diamètre variant entre 8 et 10 [mm] et de longueur d'environ 30 [cm]. Ils sont conçus pour tenir compte du passage à travers le trocart et de la distance entre le point d'incision et l'organe à atteindre. Généralement, ces instruments sont équipés d'une pince ou d'un scalpel dont le chirurgien peut modifier la configuration et l'orientation. Les images transmises par la caméra endoscopique, permettent au chirurgien de visualiser les mouvements et les gestes qu'il effectue avec ses instruments à l'intérieur du corps du patient.

Pour ce dernier, l'acte mini-invasif est un confort indéniable comparé à la chirurgie ouverte classique. La taille limitée des incisions signifie un traumatisme réduit et beaucoup moins de douleurs post-opératoires. Ceci implique un séjour plus court à l'hôpital et une récupération plus rapide. Les cicatrices étant également plus petites, le patient y trouve un intérêt esthétique certain (Figure 1.1(c)).

La chirurgie cardiaque : l'acte mini-invasif à cœur battant

Mis à part les problèmes liés à une voie d'abord large, la chirurgie cardiaque se caractérise par une difficulté supplémentaire définie par le fait que le cœur est un organe en mouvement. Les contractions cardiaques ainsi que les mouvements respiratoires induisent des déplacements à forte dynamique et d'amplitudes importantes par rapport au geste à réaliser. Dans le cas d'un pontage coronarien par exemple, les sutures sont réalisées sur des artères d'environ 2 [mm] de diamètre pour des déplacements de la paroi cardiaque estimés à 15 [mm] avec une accélération maximale de 2g ($g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$) [Cuvillon, 2006]. De plus, cette activité doit être assurée en permanence pour irriguer en oxygène tous les organes du corps.

Afin de s'affranchir du mouvement du cœur, les chirurgiens ont proposé une méthode pour court-circuiter son travail et opérer sur un cœur arrêté. Son principe consiste à mettre en place une machine, appelée machine **cœur-poumon** (Figure 1.2), qui réalise une cir-

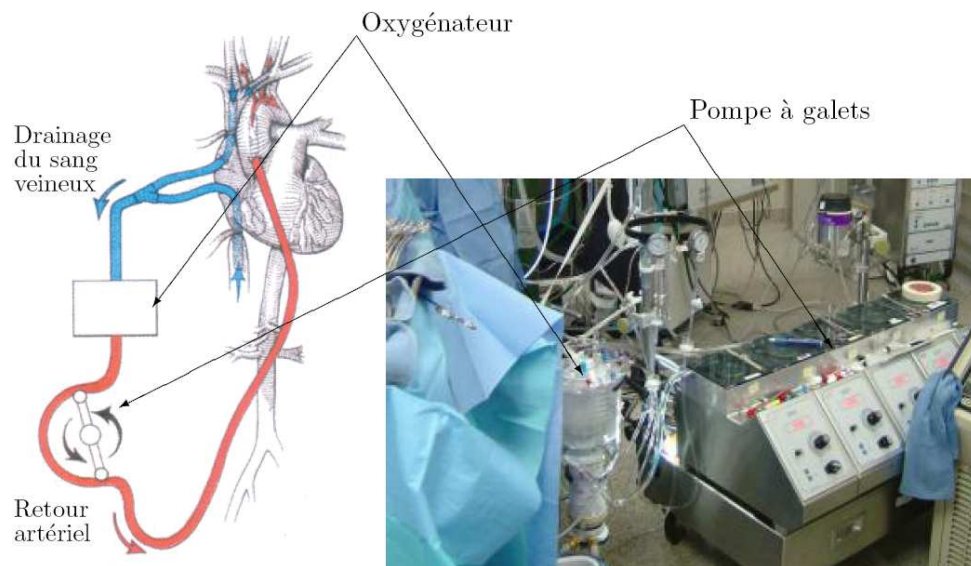


Figure 1.2 - *Circulation extra-corporelle. Machine cœur-poumon et principe de mise en œuvre* [Viguier, 2005].

circulation extra-corporelle (CEC) assurant ainsi les fonctions de pompe et d'oxygénation du sang. Cependant, cette pratique est très certainement une des plus éprouvantes des interventions chirurgicales. En effet, elle nécessite non seulement une ouverture du sternum pour exposer le cœur (sternotomie) mais en plus un arrêt momentané de l'organe avec mise en place d'une circulation extra-corporelle. Dans certaines conditions et afin d'alléger les traumatismes chirurgicaux liés à une voie d'abord large, une sternotomie partielle peut être effectuée. L'incision se fait alors au niveau supérieur du sternum sur une longueur allant jusqu'à 5 [cm] maximum. La visibilité du chirurgien devient alors très limitée malgré une agressivité chirurgicale proche de celle d'une sternotomie classique. Néanmoins, mis à part les traumatismes chirurgicaux induits par la voie d'abord, une part non négligeable des complications observées lors d'une intervention chirurgicale cardiaque, est attribuée à l'arrêt cardiaque et l'utilisation de la CEC. Des phénomènes inflammatoires très importants, un risque hémorragique non négligeable, une agression myocardique plus ou moins sévère, des complications neurologiques ou encore des saignements per-opératoires peuvent être constatés [Eagle *et al.*, 2004]. De plus, la convalescence du patient nécessite très souvent du temps, du fait de l'apparition d'une fatigue due à un ralentissement de l'activité physique, à la maladie cardiaque elle-même et bien souvent à l'anxiété provoquée par l'intervention chirurgicale et le séjour hospitalier.

Ces différentes limitations ont conduit certaines équipes chirurgicales à examiner des techniques moins invasives visant à minimiser les risques inhérents liés à cette chirurgie cardiaque "classique". Exclusivement réservée au pontage coronarien, une solution mécanique permettant de limiter les mouvements du cœur a été proposée [Borst *et al.*, 1996]. Le chirurgien accède alors à la surface du cœur en effectuant une petite incision entre deux côtes du thorax (mini-thoracotomie). Il utilise un écarteur sur lequel il fixe un stabilisateur mécanique (Figure 1.3). Le mécanisme, par action d'aspiration ou de pression, permet la stabilisation locale d'une région d'intérêt se trouvant à la surface du cœur. L'intérêt de cette technique est double puisque d'une part, elle permet de travailler sur une zone stabilisée sans avoir recours à une CEC, et d'autre part, elle limite la voie d'abord et ses effets indésirables [Wijeysundera *et al.*, 2005].

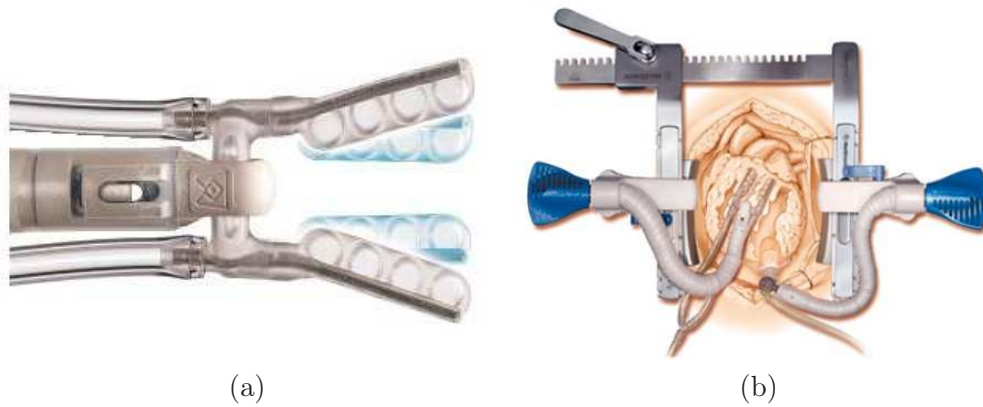


Figure 1.3 - *Stabilisateur mécanique Octopus™ (Medtronic Inc) : (a) stabilisateur et (b) vue du mécanisme fixé sur un écarteur (source : www.medtronic.com).*

1.1.1.2 Limitations de la chirurgie mini-invasive

Si les procédures mini-invasives présentent des avantages incontestables pour les patients, elles rendent le travail du chirurgien beaucoup plus délicat. En effet, le principe même de la chirurgie mini-invasive, contraint le geste du chirurgien et limite ses capacités sensorielles dans le cas d'une voie d'abord plus réduite et rend ce geste encore plus difficile à réaliser dans le cas d'une intervention chirurgicale cardiaque à cœur battant. Parmi les difficultés, nous pouvons citer :

- *La vision* - les images transmises par la caméra endoscopique sont des images en deux dimensions (2D). Le chirurgien perd la notion de relief et doit mentalement situer l'emplacement de ces instruments par rapport aux organes. Ceci rend l'acte chirurgical mentalement fatigant (Figure 1.4).
- *La mobilité* - le chirurgien manipule les instruments chirurgicaux autour d'un point fixe placé à la surface du corps du patient (le trocart). De ce fait, leurs déplacements le long du plan tangent à la peau deviennent impossibles. Leurs mobilités à l'intérieur du corps du patient se réduisent et passent de six degrés de liberté (ddl) habituels (trois translations et trois rotations) à seulement quatre (trois translations et une rotation).
- *L'effet fulcrum* - la contrainte de *mobilité* et du passage par le trocart induit une inversion des déplacements de l'instrument par rapport à ceux du chirurgien. Ce dernier doit mentalement prendre en considération cette inversion.
- *Les mouvements physiologiques* - la respiration et les battements cardiaques provoquent des déplacements périodiques des organes que le chirurgien doit mentalement suivre. Lors d'une intervention chirurgicale cardiaque, le recours à une mini-thoracotomie et une stabilisation mécanique n'est pas une solution tout à fait satisfaisante puisque des mouvements résiduels à l'intérieur de la zone "stabilisée" ont été enregistrés [Lemma *et al.*, 2005]. Ces mouvements, variant de 1,5 à 2,4 [mm], compliquent le travail du chirurgien qui doit les compenser pour pouvoir effectuer des gestes sur des artères d'un diamètre moyen d'environ 2 [mm].
- *La précision* - les instruments dédiés à cette pratique sont fins et de longueur allant jusqu'à 30 [cm]. Cette longueur importante permet certes d'atteindre un grand



Figure 1.4 - *Position de l'équipe chirurgicale effectuant une intervention mini-invasive* (source : www.gynlaparoscopy.com).

espace de travail, mais amplifie les tremblements du chirurgien. Les gestes qui demandent une grande précision mais qui sont considérés comme classiques et habituels en chirurgie, deviennent très difficiles à réaliser.

- *La sensation* - le frottement induit par le fait que les instruments sont en contact permanent avec le trocart, réduit la sensation et la sensibilité haptique du chirurgien. Il peut toujours ressentir le contact entre son instrument et l'organe, mais il est incapable de le caractériser. La palpation devient alors impossible à réaliser.
- *La coordination* - le chirurgien manipulant les instruments, il lui est impossible de déplacer la caméra endoscopique. C'est donc un assistant qui manipule la caméra suivant les gestes et les demandes du chirurgien. En plus de la coordination totale que cet assistant doit avoir avec le chirurgien, il est confronté à une partie des contraintes imposées par la chirurgie mini-invasive à savoir la *mobilité*, la *précision* et les *mouvements physiologiques*.

Au travers cette synthèse de la procédure chirurgicale mini-invasive, nous avons montré qu'aussi avantageuse qu'elle puisse l'être pour les patients, elle l'est beaucoup moins pour le chirurgien. Le plus souvent, elle complique le travail de l'équipe médicale et les gestes du chirurgien.

1.1.1.3 Vers une assistance robotique

En chirurgie, l'aboutissement et le succès de l'acte opératoire possédaient une priorité bien plus importante que celle des effets secondaires, post-opératoires ou esthétiques constatés chez le patient. Depuis quelques années, les nouvelles techniques offrent des procédures chirurgicales très efficaces, d'un point de vue chirurgical, et bien plus confortables pour le patient. Cependant, ces techniques de chirurgie mini-invasive (et à cœur battant) permettent des conditions de convalescence bien plus satisfaisantes pour le patient au détriment des capacités et du confort du chirurgien.

L'introduction d'une assistance robotique dans le milieu hospitalier peut donc seconder le chirurgien et contribuer à une meilleure qualité de ses gestes en offrant des solutions aux contraintes engendrées par l'acte mini-invasif, des conditions de travail plus confortables et des possibilités d'action identiques à celles de la chirurgie classique ouverte.

1.1.2 La robotique médicale

Depuis l'introduction du premier robot dans le milieu hospitalier en 1985 (manipulateur industriel **PUMA** dans le domaine de la neurochirurgie [Kwoh *et al.*, 1988]), de nombreux systèmes ont été proposés avec un objectif toujours identique : apporter une assistance au chirurgien et améliorer les conditions d'hospitalisation du patient [Bourgeois et Decouvelaere, 2004]. Selon le domaine, cette assistance peut être de positionner des instruments [Maurin *et al.*, 2006], de réaliser des ablations et des prélèvements d'une manière encore plus précise que ceux réalisés manuellement [Davies *et al.*, 1993], de contraindre les mouvements et les incisions à des régions prédéterminées [Schneider et Troccaz, 2001], d'augmenter l'espace de travail en démultipliant les gestes [Guthart et Salisbury, 2000], de filtrer les tremblements [Riviere *et al.*, 2003], de recalculer par rapport à des images pré et per-opératoires [DiMaio *et al.*, 2007], de mémoriser et répéter des séquences de mouvement [Kang et Wen, 2002], [Dombre *et al.*, 2004], d'interagir avec le chirurgien et lui transmettre des informations [Hagmann *et al.*, 2004], etc ...

Dans les paragraphes suivants dédiés à une présentation, non exhaustive, de la robotique médicale, nous nous intéresserons d'abord aux solutions proposées pour pallier les difficultés associées à certaines spécialités médicales et chirurgicales. Nous distinguerons ensuite les différents systèmes robotiques par rapport à leurs degrés d'interaction avec l'équipe médicale. Tout au long de cette présentation, nous porterons un intérêt particulier aux systèmes dédiés à la chirurgie mini-invasive et aux solutions apportées par rapport aux contraintes engendrées et définies dans le §1.1.1.2.

1.1.2.1 Les systèmes existants

Assistance au geste chirurgical en orthopédie

Lors de la mise en place d'une prothèse orthopédique, la découpe de l'os doit être la plus précise possible pour s'adapter à la forme de la prothèse. La qualité de la découpe limite les risques de reprise chirurgicale et augmente la durée de vie de la prothèse. La recherche d'un geste chirurgical de plus grande qualité est l'une des principales raisons qui ont favorisé l'introduction des systèmes robotiques en chirurgie orthopédique. Les premiers robots orthopédiques utilisés dans les salles d'opération sont le robot **ROBODOC** (ISS) [Taylor *et al.*, 1993] pour la chirurgie du genou et le robot **CASPAR** (URS) pour celle de la hanche [Meister *et al.*, 1998]. Malgré leurs apports respectifs indéniables pour la spécialité, ces deux robots ont fait apparaître des contraintes d'encombrement, de coût et de planification très exigeante en temps de réalisation sans pour autant apporter une réelle valeur ajoutée. De plus, leur fonctionnement autonome rend le chirurgien totalement passif par rapport au geste dont il est le seul spécialiste. La solution proposée par le robot **BRIGIT** [Maillet *et al.*, 2005] permet au chirurgien de planifier les coupes et de réaliser l'intervention après le positionnement par le robot d'un guide de coupe en s'aidant directement des structures anatomiques du patient. La phase de planification est intuitive pour le chirurgien qui configure le plan de coupe et réalise lui même l'acte chirurgical [Maillet, 2006].

Assistance au geste chirurgical mini-invasif

Les premières solutions robotisées apportées aux problèmes de la chirurgie mini-invasive exposés au §1.1.1.2, ont été l'assistance à la *coordination*. Ces solutions ont permis de libérer l'assistant qui synchronise la position de la caméra endoscopique avec la position des instruments manipulés par le chirurgien. Parmi les robots porte-endoscope, citons le

robot **Aesop**¹ (Computer Motion) commandé par la voix [Allaf *et al.*, 1998] ou les robots encore commercialisés tels que le robot **EndoAssist** (Armstrong Healthcare) contrôlé par les mouvements de la tête [Aiono *et al.*, 2002] et le robot **LapMan** (MedSYS) que le chirurgien commande grâce à un joystick appelé **LapStick**² et fixé sur l'instrument chirurgical [Polet et Donnez, 2004]. Ces trois solutions s'affranchissent de la contrainte du passage par le trocart grâce à des articulations passives permettant une libre inclinaison de l'endoscope par rapport à un centre de rotation déporté. Trouvant ces robots encombrants, Berkelman *et al* [Berkelman *et al.*, 2002] proposent un robot porte-endoscope à câbles qui se place directement sur l'abdomen du patient. Appelé **LER** pour *Light Endoscope Robot*, son avantage réside, comme son nom l'indique, dans sa petite taille et sa position qui n'encombre pas la table d'opération et qui permet une compensation naturelle des mouvements physiologiques. De plus et afin d'alléger le travail du chirurgien, ce robot dispose non seulement d'un système de commande vocale mais aussi de positionnement automatique de l'endoscope par rapport aux instruments chirurgicaux [Berkelman *et al.*, 2003a].

Inspirée du robot porte-endoscope **Aesop**, la société Computer Motion a développé le premier système commercial télé-opéré **Zeus**. L'objectif de ce système était de fournir des solutions aux contraintes engendrées par la chirurgie mini-invasive telles que la *coordination*, la *mobilité* à l'intérieur du corps du patient et la *précision* des gestes du chirurgien (cf. §1.1.1.2). Il était composé d'un couple de robots maître/esclave, permettant au chirurgien de télé-opérer, à partir d'une station de commande, des outils placés au niveau de l'organe terminal d'un bras articulé. Ce dernier était constitué d'un ensemble de trois bras de type **Aesop** (un robot porte-endoscope et deux porte-outils). La station de commande comportait deux bras maîtres et un écran vidéo sur lequel le chirurgien peut visualiser les images transmises par la caméra endoscopique. Après le rachat de Computer Motion par la société Intuitive Surgical³, le robot **Da Vinci** est devenu aujourd'hui le seul produit commercial dédié à la chirurgie mini-invasive télé-opérée [Guthart et Salisbury, 2000]. Dans le paragraphe 1.1.2.2 dédié aux systèmes télé-opérés, nous détaillerons ces deux systèmes ainsi que d'autres solutions télé-opérées proposées pour pallier les contraintes liées à la chirurgie mini-invasive.

Afin de s'affranchir de la contrainte de *mobilité* due au passage par le trocart (cf. §1.1.1.2), des solutions proposent d'équiper l'extrémité des instruments d'un dispositif permettant l'orientation de l'outil chirurgical et/ou fermeture/ouverture d'une pince. Ce qui permet d'augmenter la dextérité du chirurgien à l'intérieur du corps du patient. Les problèmes posés par l'instrumentation médicale mini-invasive posent alors deux contraintes majeures : la première concerne le dimensionnement de ces structures qui ne doit pas dépasser le diamètre inférieur du trocart au travers duquel elles seront introduites. La seconde, liée à ce petit dimensionnement, concerne la technique d'actionnement des degrés de liberté à intégrer au bout de l'instrument de chirurgie. Cet actionnement peut être local à proximité de la partie terminale et disposant d'une micro-motorisation [Sallé *et al.*, 2004], ou distant utilisant une transmission mécanique rigide [Arata *et al.*, 2005] ou à câbles [Madhani *et al.*, 1998]. C'est d'ailleurs une transmission à câbles qu'utilisent les instruments **Hyper Finger** à 9 ddl [Ikuta *et al.*, 2003] et **EndoWrist**^{TM3} à 3 ddl du système télé-opéré **Da Vinci** (Intuitive Surgical). Exposée à la même contrainte de dimensionnement, la conception d'un instrument de mesure, tel un capteur d'effort [Berkelman

¹pour *Automatic Endoscopic System for Optimal Positioning*,, <http://www.computermotion.com>

²<http://www.medsys.be/>

³<http://www.intuitivesurgical.com>.

et al., 2003b], pose un autre problème lié à la stérilisation et la bio-compatibilité des matériaux avec les tissus. Des solutions utilisant un alliage bio-compatible [Peirs *et al.*, 2004] ou considérant un capteur d'effort détachable et stérilisable [Seibold *et al.*, 2005] ont été proposées.

Assistance au geste en imagerie interventionnelle

Outre la possibilité d'offrir une information visuelle pour le diagnostic d'une anomalie, d'une malformation, etc ..., les systèmes d'imagerie médicale permettent la réalisation de nouvelles opérations mini-invasives. Ainsi en imagerie interventionnelle, le chirurgien introduit une aiguille à travers les tissus du patient pour atteindre un organe afin d'y effectuer un traitement local (ponction, biopsie, etc ...). L'apport de ces procédures est alors double puisqu'elles permettent un diagnostic et en même temps une possibilité thérapeutique. Cependant, elles posent un certain nombre de problèmes pour le chirurgien. En effet, l'acte de ponction considéré comme mini-invasif, impose les mêmes contraintes que celles définies dans le paragraphe 1.1.1.2. De plus, dans le cas où l'imageur utilise une technique irradiante initialement peu nocive (à base de rayons X⁴), la pratique quotidienne devient dangereuse pour le chirurgien. C'est pour pallier ces problèmes que des solutions robotiques peuvent être développées. Elles peuvent être compactes et compatibles avec plusieurs systèmes d'imagerie à rayon X, comme c'est le cas du robot **PAKY** [Taylor et Stoianovici, 2003] et télé-opérées comme le robot **AcuBot** [Stoianovici *et al.*, 2003].

Généralement, les solutions robotisées en imagerie interventionnelle proposent une phase de planification dans laquelle le chirurgien choisit deux points pour définir la trajectoire à suivre. Le robot peut alors jouer le rôle d'un guide pour l'insertion manuelle de l'aiguille [Kronreif *et al.*, 2003], [Hata *et al.*, 2005], ou réaliser l'insertion de manière autonome [Masamune *et al.*, 2001]. Dans ce cas, la trajectoire de référence ainsi que l'évolution de l'aiguille peuvent être visualisées sur les images fournies par l'imageur [DiMaio *et al.*, 2007]. Considérant que les mouvements du patient perturbent l'acte d'insertion de l'aiguille, certaines solutions proposent des mécanismes où le capteur et le porte-aiguille sont rigidement couplés [Hong *et al.*, 2004] ou se placent directement sur le corps du patient comme c'est le cas du **CT-Bot** conçu au LSIIT⁵ de Strasbourg [Maurin *et al.*, 2004b].

Assistance au geste en chirurgie des tissus mous

La chirurgie des tissus mous (abdominale, cardiaque, neurochirurgie, imagerie interventionnelle) est confrontée à deux problèmes spécifiques qui sont *la mobilité* et *la déformation* des organes :

- *La mobilité* - la mobilité des organes mous est liée à leur nature anatomique, leur structure tissulaire ou physiologique. Elle est essentiellement due à la respiration qui déforme ou fait varier le volume de ces organes. Compte tenue du degré de mobilité des organes d'une part et de la durée de l'intervention chirurgicale d'autre part, ces mobilités ont été classées par Barbe *et al* [Barbe *et al.*, 1996] suivant trois types : 1) limitée qui ne présente pas un réel problème pour l'acte chirurgical, 2) imprévisible qui survient d'une manière anarchique et qui ne peut pas être prévue ni quantifiée et 3) prévisible comme celle du cœur qui représente la contrainte supplémentaire posée par les interventions chirurgicales cardiaques (cf. §1.1.1.2). Pour ce dernier, il est possible de prévoir, d'identifier, de modéliser et de prendre en compte sa mobilité prévisible dans la stratégie de commande d'un robot. C'est d'ailleurs sur ce caractère prévisible que se sont basés les

⁴La radiographie ou la tomographie axiale calculée (CT-scan ou Scanner X).

⁵pour Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télé-détection.

premiers résultats *in-vivo* concernant la compensation des mouvements cardiaques présentés dans [Nakamura *et al.*, 2001]. Ces résultats ont été obtenus grâce à la commande par asservissement visuel d'un robot à 4 ddl spécialement conçu pour les interventions chirurgicales cardiaques. Avec une architecture de commande de type prédictif, Gangloff *et al* [Gangloff *et al.*, 2006] ont également présenté des résultats de suivi de mouvements physiologiques réalisés *in-vivo* avec le robot porte-endoscope **AESOP**. L'objectif principal est de fournir au chirurgien des images endoscopiques dans lesquelles le cœur apparaît virtuellement à l'arrêt.

- *La déformation* - la déformation d'un organe est variable selon sa nature tissulaire, sa rigidité ou son élasticité. Il existe deux types de déformation. Les déformations passives et celles qui sont liées au fonctionnement propre de l'organe comme c'est le cas du cœur dont le fonctionnement induit sa mobilité et sa déformation. Les déformations passives sont liées à l'acte médical ou chirurgical. Elles peuvent être dues à la position du patient ou, plus fréquemment, à une contrainte externe provoquée par l'action d'un opérateur ou d'un instrument en imagerie interventionnelle par exemple. La plupart des travaux concernant la déformation des organes ont d'ailleurs été développés afin d'offrir un outil informatique d'aide à la réalisation de ce type de geste chirurgical (biopsie, ponction, ...). Citons par exemple les travaux concernant l'identification des différentes phases d'insertion d'une aiguille qui visent une meilleure compréhension du geste [Simone et Okamura, 2002], [Maurin *et al.*, 2004a] ou un outil de simulation pour les chirurgiens développé dans [DiMaio et Salcudean, 2003]. Nous pouvons également mentionner l'assistance pour le diagnostic avec le robot **Hippocrate** [Pierrot *et al.*, 1999] qui porte une sonde échographique qu'il déplace le long de l'artère carotide ou fémorale en appliquant un effort constant permettant des déformations toujours identiques et donc un suivi thérapeutique régulier plus fiable.

1.1.2.2 Autonomie et degré d'interaction

La présentation de ces quelques exemples montre clairement l'apport que peut avoir la robotique pour assister les chirurgiens dans la réalisation de leurs gestes. Cependant, l'utilisation de ces systèmes robotisés se fait dans des milieux où les interactions avec le personnel médical sont nombreuses. Ceci pose des problèmes de sécurité et d'interaction entre l'homme et la machine. À cet égard, une classification qui se base sur le degré d'autonomie et d'interaction du robot par rapport et avec le personnel soignant a été proposée dans [Davies, 2002]. Cette classification permet de distinguer les systèmes **Autonomes**, les systèmes **Synergiques**, qui sont directement manipulés par le chirurgien, et les systèmes **Télé-opérés** qui sont commandés par le chirurgien mais à distance grâce à une console de télé-manipulation.

Systemes autonomes

Les systèmes autonomes sont des systèmes robotiques capables de réaliser seuls tout ou partie de l'intervention. Le chirurgien réalise alors uniquement la phase d'observation, de planification et de positionnement du robot. Parmi les systèmes autonomes, citons les robots **ROBODOC** (ISS) [Taylor *et al.*, 1993] et **CASPAR** (URS) [Meister *et al.*, 1998], dédiés à la chirurgie orthopédique. Une fois placés à leurs positions initiales, ces deux robots réalisent seuls l'usinage et la découpe de l'os. Le chirurgien ne fait que superviser la procédure. De la même façon, dans le contexte de l'assistance en chirurgie réparatrice des grands brûlés, le robot **SCALPP** (Projet DERMAROB) [Dombre *et al.*, 2003] réalise

le prélèvement de la peau grâce à un dermatome fixé sur son effecteur. Après une phase d'apprentissage dans laquelle le chirurgien précise les points initial et final du prélèvement, le robot effectue le prélèvement en appliquant un effort constant sur la peau du patient.

Cependant, l'un des inconvénients majeurs de ces systèmes, réside dans leur faible capacité d'adaptation. L'autre inconvénient est lié à leur principe même de fonctionnement autonome qui limite l'interaction avec le corps médical.

Systèmes synergiques

Les systèmes synergiques permettent une plus grande interaction avec le corps chirurgical. Dans ce cas, l'instrument de chirurgie est à la fois, fixé sur le robot et manipulé par le chirurgien. Cela permet de mettre en œuvre le savoir-faire du chirurgien et la capacité du robot à réaliser des gestes d'une grande précision. Ces systèmes aident à définir, limiter et contraindre un espace de travail afin de protéger les organes environnants. Par exemple, le robot **PADyC**, dédié à la ponction péricardique, restreint le mouvement de l'aiguille à une zone d'intervention définie par le chirurgien comme étant sûre [Schneider et Troccaz, 2001]. Le fonctionnement de ce robot se caractérise par plusieurs modes de travail permettant au chirurgien de non seulement limiter la zone d'intervention, mais aussi de définir la trajectoire de l'aiguille ou encore de fixer sa position pour une introduction manuelle. Les différentes contraintes sont définies par le chirurgien en manipulant le robot dans l'espace opérationnel (suivant la position et l'anatomie du patient) et sont projetées dans l'espace articulaire. Ces contraintes sont respectées grâce à des articulations munies de roues libres et un mécanisme d'embrayage permettant ou non les déplacements suivant un sens donné.

Parmi les systèmes synergiques, plusieurs utilisent une commande en effort permettant une co-manipulation entre le chirurgien et le robot. Le robot **ACROBOT** pour la chirurgie du genou est un système à 3 ddl équipé d'un capteur d'effort fixé entre le robot et l'instrument [Jakopeć *et al.*, 2001]. Grâce à une commande en effort dédiée, le chirurgien déplace et guide l'instrument vers la zone d'intervention. Sur le même principe, l'instrument du robot **BRIGIT** (MedTech) [Maillet *et al.*, 2005] peut être déplacé par le chirurgien afin de repérer des points de l'anatomie du patient. Une fois ces points définis, une procédure d'optimisation calcule la configuration de l'effecteur du robot et les différents plans de coupe. Le robot sert alors de guide de coupe au chirurgien qui se charge lui-même d'effectuer le geste.

La sécurité de l'intervention et le degré d'interaction avec le corps chirurgical sont les principaux avantages de ces systèmes. Le chirurgien, grâce à une étroite collaboration avec le robot, réalise des actes chirurgicaux de grande qualité et avec une précision élevée.

Systèmes télé-opérés

L'intérêt initial de ces systèmes a été de pouvoir profiter des connaissances de personnes expertes distantes. De plus, la limitation des moyens financiers, la nécessité d'intervenir rapidement sur des sites éloignés ou difficilement accessibles, rendent les systèmes télé-opérés très intéressants pour le diagnostic à distance. Par exemple, les systèmes de télé-échographie développés dans le cadre des projets TER [Vilchis *et al.*, 2001] et OTELO [Delgorge *et al.*, 2005], permettent à un spécialiste situé dans un centre hospitalier de diagnostiquer un patient distant en pilotant une sonde échographique portée par un robot.

Mais les systèmes télé-opérés peuvent également apporter des solutions aux contraintes engendrées par la chirurgie mini-invasive, définies dans le §1.1.1.2. Ainsi, le robot commercial **Da Vinci** illustré sur la Figure 1.5, est un système télé-opéré constitué d'une

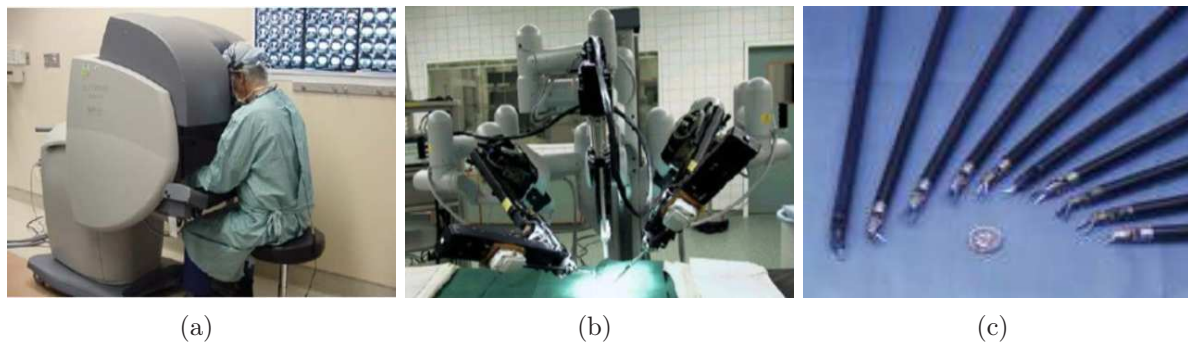


Figure 1.5 - Le robot télé-opéré **Da Vinci**TM dédié à la chirurgie mini-invasive. (a) Station maître du robot, (b) station esclave avec deux bras porte-outils et un bras porte-endoscope et (c) l'ensemble des instruments **EndoWrist**TM.

station de commande à partir de laquelle le chirurgien peut contrôler un ensemble d'instruments portés par deux robots esclaves porte-outils et un porte-endoscope. Grâce à une architecture mécanique active de type double pantographe, une stratégie de commande adéquate, une démultiplication des mouvements et aux instruments chirurgicaux **EndoWrist**TM (Figure 1.5(c)), le passage par trocart est respecté, les mouvements du chirurgien sont filtrés et ne sont plus inversés (contrainte liée à la *précision* et l'*effet fulcrum*) et la dextérité de ses gestes à l'intérieur du corps est retrouvée (contrainte liée à la *mobilité*). Pour améliorer la visibilité à l'intérieur du corps du patient (contrainte liée à la *vision*), la console de commande du robot **Da Vinci** offre au chirurgien une vue stéréoscopique de la scène (3D). Les images perçues sont acquises par un endoscope muni de deux optiques et de deux caméras [Guthart et Salisbury, 2000]. Avec le système **Da Vinci**, le chirurgien retrouve ainsi une visualisation en relief, des mouvements naturels et une grande mobilité à l'intérieur du corps du patient. La télé-opération devient alors très intuitive et une grande partie des conditions de manipulation de la chirurgie ouverte est virtuellement reconstruite. Cependant, à cause du caractère télé-opéré de la plate-forme, le chirurgien perd la sensation du contact. Il lui est alors impossible de quantifier les efforts qu'il exerce avec ses instruments sur les organes. Ceci devient encore plus contraignant lors d'une intervention chirurgicale cardiaque dans laquelle le chirurgien doit lui-même compenser les mouvements de l'organe [Kappert *et al.*, 2001]. En effet, jusqu'à aujourd'hui, la plate-forme du **Da Vinci** ne propose aucune solution pour la mesure et la restitution des efforts au chirurgien ni pour la compensation des mouvements physiologiques.

Plusieurs autres systèmes télé-opérés dédiés à la chirurgie mini-invasive ont été proposés mais sont encore au stade de prototypes. Ces plate-formes ne proposent pas encore de solution complète pour pallier les contraintes imposées par la chirurgie mini-invasive mais utilisent cependant des architectures mécaniques différentes que celles mentionnées précédemment pour le respect du passage par le trocart. Citons par exemple la plate-forme à 8 ddl **The Black Falcon** (et son prédécesseur à 7 ddl **The Silver Falcon**) proposée dans [Madhani, 1998] et illustrée sur la Figure 1.6. Ces deux robots possèdent une architecture à deux étages : "Macro" en parallélogramme créant un centre de rotation déporté et "Micro" à 4 ddl permettant des mouvements à l'intérieur du corps. Sur le même principe, la plate-forme **RTW**⁶ [Çavuşoğlu *et al.*, 1999], [Çavuşoğlu *et al.*, 2001] propose un manipulateur esclave alliant architecture parallèle (premier étage) et série (deuxième étage). Les articulations passives du premier étage permettent le passage par

⁶pour *Robotic Telesurgery Workstation*.

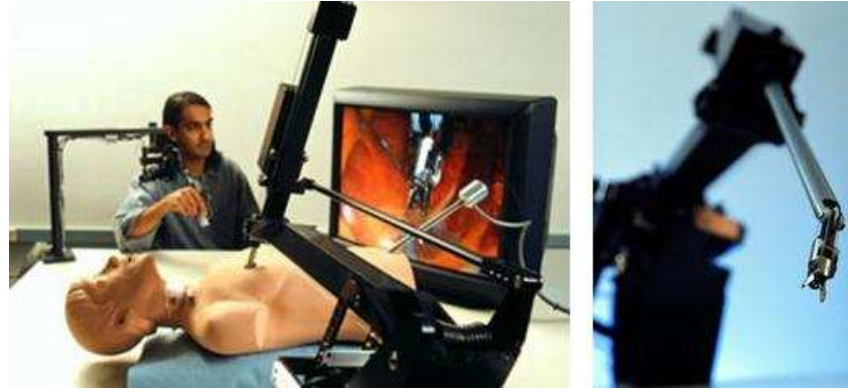


Figure 1.6 - La plate-forme **The Black Falcon** dédiée à la chirurgie mini-invasive télé-opérée [Madhani, 1998].

le trocart et le positionnement du mécanisme série. Le système **ARTEMIS**⁷ développé en Allemagne est une solution à base de poulies et de courroies pour gérer le passage par le trocart [Rininsland, 1999]. Un principe similaire a été utilisé dans le projet RNTS⁸ EndoXirob⁹.

L'analyse des robots **Zeus** et **Da Vinci** met en évidence un dispositif chirurgical télé-opéré volumineux, lourd, très coûteux et qui s'avère contraignant pour le corps médical. Pour ces raisons, certains travaux de recherche se sont focalisés dans la réalisation mécanique de dispositifs télé-opérés légers et beaucoup moins encombrants pour la chirurgie mini-invasive. Comme le robot porte-endoscope **LER** ou le guide aiguille **CT-Bot**, le robot **MC²E**¹⁰ [Zemiti *et al.*, 2004] de l'ISIR¹¹ s'installe directement sur l'abdomen du patient (Figure 1.7(a)). Ainsi illustré sur la Figure 1.7(b), ce robot comporte deux parties. Après l'introduction du trocart dans l'abdomen, la partie inférieure y est directement attachée. Grâce à deux articulations rotoïdes à axes concourants, cette structure assure la rotation du robot autour d'un point fixe qui coïncide avec le point d'incision. La partie supérieure, montée sur le trocart fournit une rotation et une translation autour et suivant l'axe de l'instrument. Équipé d'un dispositif à capteur d'effort, il permet de réduire les frottements lors de la manipulation autour du trocart.

1.1.2.3 Conclusion

Ce bref aperçu de la robotique médicale n'est évidemment pas complet. Il permet néanmoins d'illustrer les potentialités de la robotique pour le patient et le chirurgien. Ainsi, les diagnostics sont plus fiables, les gestes plus précis et les interventions chirurgicales moins invasives. Ce qui permet un séjour hospitalier moins long et beaucoup plus confortable.

Dans la suite, nous nous intéresserons plus particulièrement aux systèmes télé-opérés dédiés à la chirurgie mini-invasive. Les systèmes actuels, aujourd'hui encore, présentent un manque de fonctionnalité et d'autonomie en particulier face à la contrainte de *sensation* et à celle de compensation des *mouvements physiologiques*.

⁷pour *Advanced Robot and Telem manipulator System for Minimal Invasive Surgery*.

⁸pour *Réseau National des Technologies et la Santé*.

⁹<http://www.endoxi rob.com>.

¹⁰pour *Manipulateur Compact pour la Chirurgie Endoscopique*.

¹¹pour *Institut des Systèmes Intelligents et Robotique*.

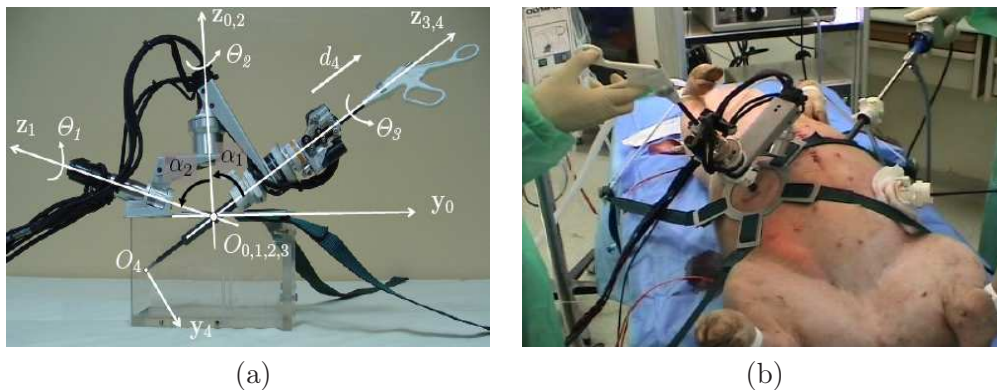


Figure 1.7 - *Système robotique télé-opéré dédié à la chirurgie mini-invasive MC²E du LRP à faible encombrement [Zemiti, 2005]. (a) Architecture mécanique du robot et (b) mis en place sur l'abdomen d'un cochon pour des expérimentations in-vivo.*

1.1.3 Les limitations des systèmes télé-opérés

Parmi les limitations des systèmes télé-opérés dédiés à la chirurgie mini-invasive, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'absence de l'information et de restitution du contact au chirurgien et au manque d'autonomie face à la mobilité des organes.

1.1.3.1 La chirurgie mini-invasive et le toucher

Mis à part le retour visuel procuré par les systèmes, tels que **Zeus** ou **Da Vinci**, le chirurgien ne possède aucune autre information sur ce qui se passe à l'intérieur du corps du patient. En manipulant ses instruments, il ne peut à aucun moment connaître et quantifier les efforts qu'il exerce, par ces instruments télé-opérés, sur les organes. Généralement, le chirurgien utilise l'information visuelle, lorsqu'elle est en 3D, pour estimer la distance entre l'instrument et l'organe. Au moment du contact, ce dernier subit une déformation que le chirurgien utilise pour évaluer les efforts exercés.

Wagner *et al* [Wagner *et al.*, 2002], ont étudié et quantifié ce manque d'information sensorielle qui caractérise les systèmes de télé-opération à invasion minimale. À l'aide d'une interface haptique **PHANToM** (SensAble Technologies¹²) télé-opérant un robot équipé d'un capteur d'effort fixé entre l'instrument et un scalpel chirurgical, ils ont reproduit les conditions d'une chirurgie mini-invasive avec le passage par un point fixe, le retour visuel et la manipulation d'une patte molle dans laquelle une tige cylindrique rigide a été enfoncée. Les candidats participant à l'étude ont réalisé deux types d'expériences. La première reprend les conditions de chirurgie mini-invasive télé-opérée avec dissection de la patte molle et un dégagement de la tige sans retour d'effort. Lors de la deuxième, les efforts exercés par l'instrument sont transmis à l'opérateur au travers l'interface haptique. Une analyse comparative montre que lorsque le retour d'effort n'est pas fourni, le nombre de mauvaises réalisations est multiplié par trois et les efforts moyens et maximaux appliqués sont respectivement 50 et 200% supérieurs à ceux appliqués lors de l'expérience avec un retour d'effort. D'autres expériences proches de celles-ci ont conclu par le fait qu'une bonne stratégie de retour d'effort augmente le temps d'exécution de l'acte mais réduit fortement les gestes non intentionnels de l'opérateur [Deml *et al.*, 2005].

¹²<http://www.sensable.com>,

1.1.3.2 La chirurgie mini-invasive et le cœur battant

Dans [Kappert *et al.*, 2001], les chirurgiens ont utilisé le robot **Da Vinci** et un stabilisateur mécanique endoscopique pour réaliser des interventions de chirurgie cardiaque sur plusieurs patients. Lors de ces interventions, seul 4% ont été converties en une sternotomie médiane et 40% en une intervention mini-invasive via une mini-thoracotomie. D'une manière semblable, Loisançe *et al* [Loisançe *et al.*, 2005] ont effectué les mêmes essais que ceux réalisés par Kappert *et al*, mais n'ont pas réussi à accroître leur taux de réussite. La principale cause d'échec identifiée a été la difficulté de réaliser une suture robotisée avec une stabilisation mécanique peu efficace [Lemma *et al.*, 2005]. Ceci complique fortement le travail du chirurgien qui, mis à part la perte du sens du toucher induite par l'utilisation du robot **Da Vinci**, se voit contraint de mentalement suivre les petits mouvements de l'organe pour réaliser son geste.

1.1.3.3 Vers des systèmes télé-opérés avec retour en effort

Les résultats cliniques faisant suite à ces expériences ont montré l'intérêt que présente le retour en effort pour des applications de chirurgie mini-invasive télé-opérée. En augmentant la perception du chirurgien, il diminue l'agressivité des actes et le délabrement tissulaire des organes. Dans le cas d'une intervention chirurgicale cardiaque, la difficulté de réaliser un acte totalement endoscopique à cœur battant, montre en plus de l'intérêt du retour en effort, l'utilité de considérer un mécanisme permettant au robot de suivre ou de compenser les mouvements de l'organe. Ce suivi permettra d'améliorer les performances du stabilisateur mécanique et, à terme, de le remplacer. Il allégera ainsi le travail du chirurgien qui pourra se concentrer uniquement sur son geste chirurgical.

Ainsi, par rapport à une plate-forme de télé-opération standard (comme celle utilisée pour le robot **Da Vinci**), celle qui intègre un retour en effort met en place une architecture et une technologie différente, des instruments de mesure supplémentaires et une loi de commande adaptée. Dans ce contexte, il est essentiel de faire un tour d'horizon des systèmes de télé-opération offrant un retour en effort. L'état de l'art que nous proposons dans la suite, dépasse le cadre strict des systèmes de télé-opération dédiés à la chirurgie mini-invasive et concerne des applications diverses. Le but de cette synthèse est d'offrir une vue globale sur ces architectures ainsi que sur leurs performances.

1.2 Télé-opération avec retour d'effort

Au delà de la robotique médicale, les systèmes de télé-opération ont été largement développés des domaines et des applications divers : atteindre des zones à risque ou dangereuses pour l'homme (par exemple pour la détection de fuite dans des conduites de substances nocives [Wang et Yuan, 2004]), explorer des environnements sous-marins (pour la surveillance de l'Antarctique et le suivi des régions polaires [Bruzzone *et al.*, 2002]), ou terrestres (dans des zones à risque ou suite à une catastrophe naturelle [Fraisse *et al.*, 2005]) ou encore réaliser des actes chirurgicaux en conditions mini-invasives [Madhani, 1998], [Çavuşoğlu, 2000].

Concrètement, l'opérateur manipule l'effecteur d'une interface (un bras robotisé) et réalise des mouvements dans l'intention de les appliquer au niveau de l'environnement distant. Ces mouvements désirés par l'opérateur sont envoyés vers un manipulateur distant qui se charge de les reproduire sur son environnement. Le système de télé-opération est

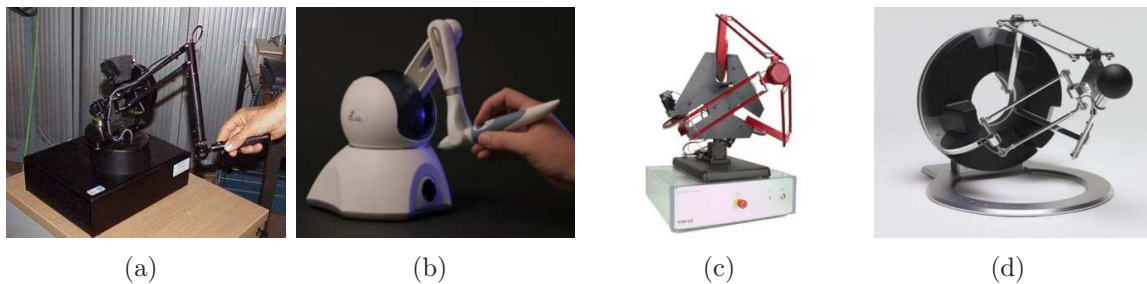


Figure 1.8 - *Interfaces haptiques à architecture série : (a) PHANToM, (b) PHANToM Omni et à architecture parallèle : (c) Delta, (d) Omega 3* (sources : www.sensable.com et www.forcedimension.com).

appelé *bilatéral* si l'environnement distant fournit une information d'effort en retour à l'opérateur [Hokayem et Spong, 2006].

Dans la suite, nous nous intéresserons principalement aux systèmes de télé-opération bilatéraux. Après une présentation générale nous proposerons un aperçu des architectures les plus utilisées par la communauté scientifique, avec une analyse et une évaluation de leurs performances.

1.2.1 Présentation générale

1.2.1.1 Définitions

Les principaux éléments d'un système de télé-opération sont :

- L'opérateur - c'est l'utilisateur qui réalise une tâche donnée sur un environnement distant. Ses actions sont véhiculées à travers tout le schéma de télé-opération pour atteindre le site en question. Cet opérateur reçoit en échange un retour en effort représentant les interactions avec l'environnement distant. Il peut aussi recevoir, suivant l'application, un retour visuel diffusé sur un moniteur vidéo.
- Environnement distant - il est composé de divers objets avec lesquels il est possible d'interagir. Physiquement, c'est le manipulateur esclave qui manipule ces objets suivant les demandes de l'opérateur. Ces objets peuvent être *a priori* connus (structurés), avec un certain degré de connaissance ou bien encore totalement inconnus.
- Interface maître - c'est une interface haptique capable de restituer une perception des interactions avec l'environnement distant. L'opérateur la manipule comme s'il réalisait directement une tâche sur l'environnement distant. Ces interfaces sont mécaniquement conçues pour minimiser les frottements et les inerties perçus au niveau de leurs organes terminaux. Elles peuvent fournir un effort (et un moment) suivant (et autour) les (des) trois directions de l'espace. Elles sont équipées de capteurs permettant de mesurer la position opérationnelle de leur effecteur dans un repère donné. Qu'elles soient d'architecture série ou parallèle, leurs principales caractéristiques sont la gamme des efforts (et moments) appliqués, la rigidité et la précision des déplacements obtenus. La Figure 1.8 montre quelques structures commercialisées par SensAble Technologie et Force Dimension.
- Contrôleur maître - c'est la loi de commande de type "logiciel" appliquée à l'interface haptique. Elle permet de reproduire au mieux les efforts perçus au niveau du

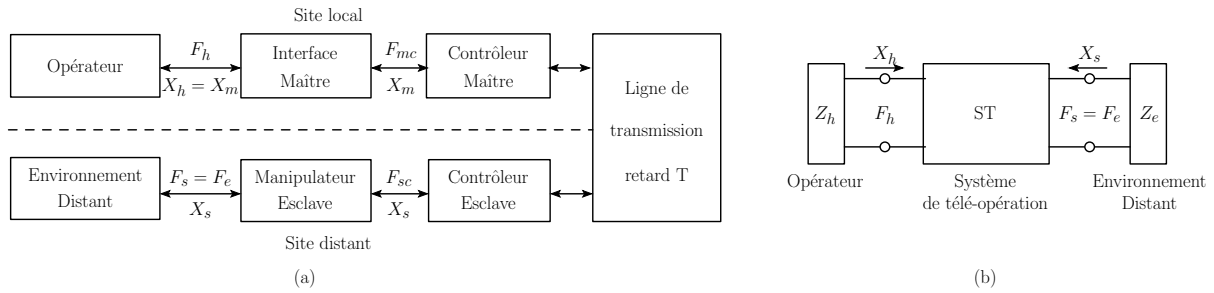


Figure 1.9 - Représentation d'un système de téléopération : (a) représentation générale et (b) représentation sous forme d'un réseau à deux ports.

site distant et fournit à l'opérateur la meilleure perception des sensations représentant les interactions avec l'environnement. Son choix est très important puisqu'une grande partie des caractéristiques et des performances du schéma de téléopération en dépend. Elle est réalisée suivant plusieurs méthodes comme cela sera exposé dans la suite de ce chapitre.

- Manipulateur esclave - c'est le robot qui se charge de reproduire et d'imiter le comportement et les gestes de l'opérateur au niveau du site distant. Il doit en plus être capable, en utilisant toute l'instrumentation qu'il possède, de fournir et transmettre les informations nécessaires au site maître et donc à l'opérateur.
- Contrôleur esclave - c'est également une loi de commande mais appliquée au manipulateur esclave. Elle permet de calculer les couples/efforts pour qu'il puisse réaliser et suivre les consignes et les mouvements imposés par l'opérateur et contraints par l'environnement. Elle doit être la plus robuste possible par exemple par rapport au retard de transmission ou encore par rapport aux caractéristiques de l'environnement distant.
- Ligne de transmission - c'est le support qui permet la transmission de données d'un site à un autre. Suivant la position physique d'un site par rapport à l'autre, la transmission peut se réaliser à travers des câbles, des ondes radio etc ... Connu ou estimé, le retard de transmission qui caractérise ce support est utilisé pour régler et optimiser les performances du schéma de téléopération.

La Figure 1.9(a) représente un schéma de téléopération bilatéral dans lequel un site local communique et interagit avec un site distant. Dans ce schéma, les efforts/moments sont représentés par la lettre F et les positions/orientations par la lettre X . Les indices h , m , c , s et e représentent respectivement les variables relatives à l'opérateur (*humain*), la station *maître*, la *commande*, la station esclave (*slave*) et l'*environnement*. Ce formalisme sera utilisé tout le long de ce manuscrit.

1.2.1.2 Caractéristiques

Un système de téléopération avec retour en effort peut être caractérisé par sa **stabilité** et sa **transparence**. Mises à part les limitations physiques des manipulateurs maître et esclave, ces propriétés dépendent essentiellement du retard de transmission et des lois de commande choisies.

Stabilité

Comme pour tout système, la stabilité d'un système de télé-opération est une contrainte de fonctionnement primordiale. Elle se définit par le fait que d'un déplacement ou d'un effort borné réalisé par l'opérateur au niveau de l'interface maître, résulte un déplacement ou un effort borné réalisé par le manipulateur esclave au niveau de l'environnement distant. Les paramètres de commande du système de télé-opération sont fixés pour garantir sa stabilité. Dans le §1.2.3.1, nous présenterons les techniques les plus utilisées pour garantir la stabilité des schémas de télé-opération.

Transparence

La transparence représente un critère de performance d'un système de télé-opération [Hannaford, 1989b]. Elle exprime la capacité du système à transmettre avec fidélité la meilleure perception possible des interactions réalisées entre le manipulateur esclave et l'environnement distant. L'opérateur a alors les mêmes sensations que s'il agissait directement sur l'environnement distant. Ainsi, la boucle de télé-opération lui paraît inexistante.

1.2.1.3 Représentation

Un système de télé-opération peut être modélisé par un réseau à deux ports reliant la force de l'opérateur F_h et sa position X_h aux variables de force F_s et position X_s du manipulateur esclave. La Figure 1.9(b) illustre le système de télé-opération représenté par un réseau à deux ports sous une forme hybride reliant l'opérateur caractérisé par une impédance Z_h à l'environnement distant d'impédance Z_e . Ce réseau est décrit par la relation [Hannaford, 1989a]

$$\begin{bmatrix} F_h \\ X_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_h \\ F_s \end{bmatrix}. \quad (1.1)$$

Dans ce formalisme hybride, les paramètres h_{ij} peuvent être interprétés physiquement : h_{12} représente la capacité du schéma de télé-opération à transmettre les efforts appliqués par le manipulateur esclave et h_{21} représente la capacité du bras esclave à suivre les mouvements du bras maître (et donc de l'opérateur). Quant à h_{11} et h_{22} , ils représentent respectivement l'impédance mécanique du poste maître et l'admittance mécanique du poste esclave.

Suivant les capteurs disponibles, d'autres représentations peuvent être considérées. Citons par exemple la représentation en impédance (ou admittance) qui relie les deux forces F_h et F_s aux deux positions X_h et X_s (ou inversement) [Yokokohji et Yoshikawa, 1994].

1.2.2 Différentes architectures

Dans [Arcara et Melchiorri, 2002], les auteurs se basent sur la stratégie de commande utilisée dans les schémas de télé-opération bilatéraux pour établir un état de l'art complet des différentes architectures. Parmi ces systèmes, nous pouvons citer les schémas avec passivité [Anderson et Spong, 1989], les techniques de commande robuste [Senéme et Fattouh, 2005], prédictive [Pan *et al.*, 2006] ou encore par mode glissant [Park et Cho, 199]. D'autres auteurs se basent sur la représentation choisie pour chacune des deux stations maître et esclave pour proposer des architectures en **Impédance** ou en **Admittance** [H.-Zaad et Salcudean, 2001]. Néanmoins, les mêmes auteurs font correspondre ces architectures à

celles qui sont les plus utilisées et qui se basent sur le type de données échangées, à savoir soit en **Position** soit en **Force** [Anderson et Spong, 1989], [Hannaford, 1989a], [Lawrence, 1993], [Çavuşoğlu *et al.*, 2002].

Dans ce paragraphe, nous nous présentons les architectures de télé-opération en fonction du type de données échangées entre les stations maître et esclave.

1.2.2.1 Architectures de télé-opération

Le schéma de télé-opération générique à 4 canaux proposé par Lawrence est certainement le plus connu et le plus utilisé par la communauté scientifique [Lawrence, 1993]. Ce schéma constitue une base à partir de laquelle il est possible de retrouver toutes les autres architectures [H.-Zaad et Salcudean, 2000], [Gersem *et al.*, 2005]. Parmi elles, nous en extrairons les deux plus utilisées à savoir le schéma **position - force** et **position - position**.

Schéma de télé-opération à 4 canaux

Le schéma de télé-opération proposé par Lawrence et donné sur la Figure 1.10(a), est un schéma à 4 canaux à travers lesquels les sites local et distant s'échangent mutuellement leurs positions (respectivement X_h et X_s) et les efforts qui y sont appliqués (respectivement F_h et F_e). Il faut souligner que la version initiale proposée dans [Lawrence, 1993], contient uniquement les blocs représentés par les traits pleins. Les autres blocs (en traits pointillés) correspondent à une boucle de commande locale permettant d'améliorer les performances du schéma de télé-opération. Il ont été introduits d'abord par Lawrence lui-même et plus tard par d'autres auteurs dont les travaux seront présentés dans la suite [H.-Zaad et Salcudean, 2002]. De même, le schéma propose initialement un échange de données en vitesse et non en position ; ce qui évite l'utilisation des positions initiales des deux manipulateurs et la mise en correspondance entre elles. Cependant, l'utilisation des positions ne change rien ni au principe même de ce schéma, ni à l'étude de sa stabilité et de ses performances [Lawrence, 1993].

Dans ce schéma, les données sont les efforts exogènes F_h^* et F_e^* (efforts de perturbation externes à la tâche) appliqués respectivement sur le site local et distant, les efforts appliqués par l'opérateur sur la station maître (F_h) et par le manipulateur distant sur son environnement (F_e), les impédances Z_h et Z_e qui représentent les actions respectives de l'opérateur et de l'environnement et enfin les impédances Z_m (et C_m) et Z_s (et C_m) décrivant respectivement les manipulateurs maître et esclave (et leurs contrôleurs locaux). Les blocs C_1 et C_3 (C_4 et C_2) représentent les lois de commande respectivement en position et en effort au niveau du site esclave (du site maître). Ces blocs ainsi que C_5 et C_6 , peuvent contenir des gains de type scalaire ou des contrôleurs dynamiques. La ligne de communication quant à elle est caractérisée par un retard de transmission.

Ce schéma à 4 canaux a été proposé afin de garantir une transparence parfaite et des marges de stabilité satisfaisantes. Néanmoins, son utilisation présente quelques limitations. En effet, il impose une connaissance parfaite des deux sites (Z_e , Z_h , Z_s et Z_m) pour concevoir les contrôleurs dynamiques utilisés dans les blocs C_i [Arcara et Melchiorri, 2002]. Il impose en plus la transmission des quatre données à travers la ligne de communication ; ce qui peut s'avérer très contraignant en particulier pour des applications longue distance qui présentent un retard de transmission important [H.-Zaad et Salcudean, 2002]. Enfin, ce schéma nécessite l'utilisation de quatre capteurs, deux en position et deux en effort, installés au niveau de chacune des stations. Or le capteur d'effort est un élément

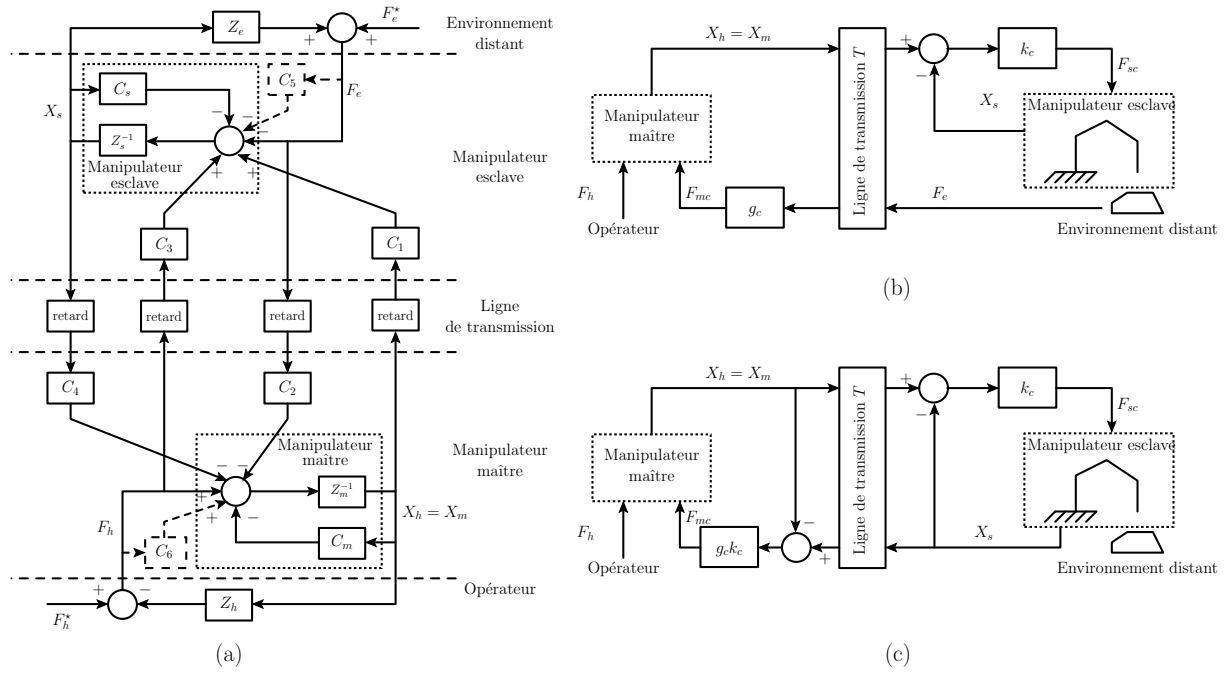


Figure 1.10 - Aperçu des schémas de télé-opération proposés : (a) schéma de télé-opération générique à 4 canaux proposé par Lawrence [Lawrence, 1993], (b) schéma de télé-opération position - force et (c) schéma de télé-opération position - position.

de mesure très coûteux. De plus, son installation au niveau de la station maître nécessite une conception adaptée et onéreuse de l'interface haptique [Preusche *et al.*, 2002]. Ainsi, à la suite d'une comparaison entre plusieurs architectures de télé-opération, Arcara et Melchiorri [Arcara et Melchiorri, 2002] ont montré qu'il était possible d'avoir des performances acceptables même avec un seul capteur d'effort.

Schéma de télé-opération position - force

En choisissant $C_3 = C_4 = 0$ dans le schéma à 4 canaux de Lawrence, le schéma de télé-opération obtenu se réduit à un schéma position - force donné par la Figure 1.10(b). Dans ce cas, seule la position de la station maître est transmise au manipulateur distant. À l'inverse, le manipulateur esclave transmet uniquement les efforts qu'il applique sur l'environnement à l'opérateur. Par rapport au schéma 4 canaux, un seul capteur d'effort est utilisé et uniquement deux données sont transmises d'un côté à l'autre du système. Ce schéma de télé-opération permet à l'opérateur de percevoir les vrais efforts appliqués par le manipulateur esclave sur son environnement [Çavuşoğlu *et al.*, 2001]. Cependant, il est à noter, que si le manipulateur esclave n'est pas en contact avec son environnement (déplacement dans un espace libre par exemple), l'opérateur ne possède aucune information en retour du site esclave. C'est l'un des principaux avantages du schéma de télé-opération position - position que nous présentons ci-dessous.

Schéma de télé-opération position - position

Le schéma de télé-opération position - position s'obtient en fixant $C_2 = C_3 = 0$ dans l'architecture à 4 canaux (Figure 1.10(c)). Dans ce schéma, seules les positions des manipulateurs sont utilisées. L'erreur entre les deux positions est utilisée, du côté esclave pour reproduire les mouvements de l'opérateur et du côté maître pour assurer le retour

d'effort.

L'avantage de ce schéma est de réduire le nombre de capteurs puisqu'il ne nécessite pas l'utilisation de capteur d'effort. De plus, il permet à l'opérateur de percevoir, à travers l'erreur en position, les mouvements du manipulateur esclave en espace libre. Cette propriété est très intéressante lorsqu'il faut limiter l'espace de travail du manipulateur esclave ou considérer des interactions entre ce dernier et une personne extérieure (pour un déplacement manuel de l'effecteur ou le changement d'un instrument par exemple). Néanmoins, le fait de ne pas utiliser de capteur d'effort procure des sensations de moindre qualité lors d'une interaction avec un objet distant [Çavuşoğlu *et al.*, 2001]. Pour améliorer les performances de ce schéma, dans [Çavuşoğlu *et al.*, 2002], le retour d'effort est assuré grâce à une combinaison linéaire entre l'erreur en position et les efforts appliqués par le manipulateur esclave sur son environnement. De la même façon, Cortesão *et al* [Cortesão *et al.*, 2003] considèrent que l'erreur en position perçue par l'opérateur est un effort désiré que le manipulateur esclave doit appliquer sur son environnement. Ils proposent alors une commande en effort pour contrôler le manipulateur esclave.

1.2.2.2 Discussion

Grâce à un choix adéquat des variables de commande C_i , d'autres schémas de télé-opération sont proposés afin d'améliorer la perception de l'opérateur par rapport aux schémas position - position ou position - force. Citons par exemple les schémas de télé-opération force - force ou force - position [H.-Zaad et Salcudean, 2000]. Ces architectures nécessitent la mesure des efforts appliqués par l'opérateur au niveau de l'interface haptique. Pour éviter l'installation d'un capteur d'effort à ce niveau, un équilibre peut être considéré entre les efforts F_h appliqué par l'opérateur et ceux par le retour haptique [Preusche *et al.*, 2002]. Néanmoins, leur principal inconvénient réside dans la faible capacité du manipulateur esclave à reproduire les mouvements de l'opérateur comme le mentionnait déjà [Kazerooni *et al.*, 1993].

Dans [H.-Zaad et Salcudean, 2002], les auteurs se basent sur le schéma de télé-opération de Lawrence pour proposer une architecture à 3 canaux. Ce schéma utilise le bloc C_5 (ou C_6) pour réaliser un retour local de l'effort et éviter ainsi sa transmission à travers le canal C_2 (ou C_3) (cf. Figure 1.10(a)). L'élimination d'un canal de transmission a été réalisée tout en maintenant les performances du schéma à 4 canaux. Ce retour local en effort ou en position a d'ailleurs été utilisé pour améliorer les performances de certains autres schémas de télé-opération tels que le schéma position - position [Cortesão *et al.*, 2003], [Tadano et Kawashima, 2007] ou encore le schéma force - force [Reintsema *et al.*, 2004].

Parallèlement et indépendamment de Lawrence, un schéma de commande encore plus complet que celui à 4 canaux a été proposé dans [Yokokohji et Yoshikawa, 1994]. Dans ce cas, toutes les variables mesurées ou estimées, telles les vitesses et les accélérations des deux manipulateurs sont transmises d'un côté à l'autre. L'utilisation de ressources supplémentaires permet d'augmenter les performances du schéma de télé-opération mais présente des limitations majeures. La première est sa faible marge de stabilité qui rend l'architecture peu robuste par rapport à l'action de l'opérateur et à la variation des caractéristiques de l'environnement distant. La deuxième contrainte concerne la stratégie de commande qui, comme le schéma à 4 canaux, requiert une connaissance parfaite des caractéristiques dynamiques des deux manipulateurs. Enfin, la dernière contrainte réside dans la complexité de son implémentation et la nécessité d'utiliser deux capteurs d'effort.

1.2.3 Analyse des systèmes de télé-opération

L'analyse des systèmes de télé-opération se fait au travers l'évaluation de la stabilité et de la transparence. La stabilité est une nécessité de fonctionnement indispensable en tant que système dynamique. La transparence, quant à elle, se définit plutôt comme un critère de qualité relatif à la perception de l'opérateur.

1.2.3.1 Stabilité

Pour garantir la stabilité d'un système de télé-opération, deux techniques sont utilisées. La première, la plus utilisée, repose sur le concept de passivité. La deuxième s'appuie sur les critères de stabilité des systèmes linéaires.

La passivité

Dans un schéma de télé-opération, plusieurs systèmes communiquent et interagissent entre eux. Parmi ces systèmes, l'opérateur et l'environnement distant apparaissent comme des systèmes incertains et variables. La réaction suite à un retour en effort d'un opérateur manipulant une interface haptique, peut être différente de celle d'un autre opérateur plus expérimenté. De même, un comportement stable du manipulateur esclave n'est pas toujours assuré face à un environnement aux caractéristiques incertaines et variables. C'est à partir de ce constat, que plusieurs travaux ont introduit le concept de passivité pour assurer la stabilité des schémas de télé-opération.

Inspirée de la théorie des réseaux, un système est dit passif, si pour un état initial donné et pour une entrée quelconque au niveau de l'un de ses ports d'interaction, l'énergie totale fournie via ce port est limitée par l'énergie initiale stockée par le système [Niemeyer et Slotine, 1991]. En d'autres termes, un système est passif si l'énergie dissipée via ces ports d'interaction est toujours positive. L'une des propriétés les plus utilisées du concept de passivité consiste à dire qu'un système est passif s'il est formé par la mise en série de plusieurs sous-systèmes passifs. Ainsi, l'analyse du système global se réduit à l'analyse des sous-systèmes qui le constituent.

Généralement, en supposant que l'opérateur et l'environnement distant sont des éléments passifs, la stabilité et la passivité du schéma complet se réduit à l'étude de la passivité, à travers sa matrice d'impédance (ou d'admittance), d'un réseau à deux ports ; ce dernier étant passif si sa matrice d'impédance est Réelle Positive [Hokayem et Spong, 2006], [Zemiti, 2005].

Grâce à ce formalisme intuitif utilisant l'énergie stockée et dissipée, cette notion de passivité a été utilisée pour prouver la stabilité des schémas de télé-opération position - position ou position - force [H.-Zaad et Salcudean, 2001]. Hannaford et Ryu ont également utilisé ce concept pour proposer un schéma de télé-opération avec un *contrôleur passif* permettant de contrôler le degré de passivité du système [Hannaford et Ryu, 2002]. Ce contrôleur n'est qu'un élément passif supplémentaire capable d'absorber toute l'énergie qui pourrait provoquer l'instabilité du système. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'assurer la stabilité du système même en contact avec un environnement rigide.

Anderson et Spong en 1989 [Anderson et Spong, 1989] introduisent la théorie de *diffusion*¹³ ou de *dispersion* pour simplifier la preuve de passivité des systèmes de télé-opération avec retard de transmission. Cette théorie se base sur le fait que les signaux incidents qui sont appliqués à l'entrée d'un réseau à n -ports, se diffusent et se dispersent en plusieurs

¹³ *Scattering*, en anglais.

signaux réfléchis à la sortie du réseau. Une preuve de passivité consiste alors à dire que l'énergie des signaux incidents (à l'entrée) est totalement *diffusée* et ne peut être que supérieure à celle des signaux réfléchis (à la sortie). La mise en équation des signaux incidents et réfléchis du réseau de télé-opération à deux ports de la Figure 1.9(b) donne

$$\begin{bmatrix} F_h(s) - X_h(s) \\ F_s(s) - X_s(s) \end{bmatrix} = S(s) \begin{bmatrix} F_h(s) + X_h(s) \\ F_s(s) + X_s(s) \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

où s est l'opérateur de Laplace et S est la matrice de *diffusion* donnée par

$$S(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} (H(s) - I_{(2 \times 2)})(H(s) + I_{(2 \times 2)})^{-1}, \quad (1.3)$$

avec $I_{(2 \times 2)}$ la matrice d'identité de dimension (2×2) et H la matrice hybride donnée par la relation (1.1). En présence d'un retard de transmission, il est facile de le considérer dans la relation (1.2) en l'introduisant directement dans la matrice S . La passivité du système est garantie si la plus grande valeur singulière de la matrice S est inférieure ou égale à 1 [Hokayem et Spong, 2006], [Gersem, 2005]. Grâce à ce concept, la passivité du schéma de télé-opération à 4 canaux a été prouvée même avec un retard de transmission égal à 200 [ms] et sans utiliser de contrôleurs dynamiques comme cela avait été proposé dans [Lawrence, 1993]. Ce concept de diffusion a entre autre inspiré Niemeyer et Slotine pour définir le formalisme de variables d'onde dans lequel l'impédance des lignes de transmission est prise en compte [Niemeyer et Slotine, 1991].

La stabilité des systèmes linéaires

Dans [Hannaford, 1989b], l'auteur apporte une précision sur les limites de la théorie de la passivité en dénonçant le fait de considérer que l'opérateur et l'environnement sont des éléments passifs. En effet, par action et volonté de déplacer l'interface haptique, l'opérateur applique un effort, augmente l'énergie dans le système et ne peut donc plus être considéré comme passif [Yokokohji et Yoshikawa, 1994]. Ainsi, pour prouver et quantifier la stabilité globale du schéma de télé-opération, il convient de prendre en compte l'opérateur et l'environnement dans l'étude [Hannaford, 1989b]. Deux modèles leur sont alors associés. Ils sont décrits par un système masse-ressort-amortisseur pour l'opérateur et ressort (et quelques fois ressort-amortisseur) pour l'environnement. En utilisant la matrice hybride (ou d'impédance) du système de télé-opération, il devient possible de définir une fonction de transfert dans laquelle, le système de télé-opération, l'opérateur et l'environnement ont été considérés. L'utilisation des outils d'automatique linéaire permet alors de quantifier la stabilité du schéma de télé-opération. Dans [Lawrence, 1993], l'auteur utilise une approche fréquentielle pour montrer que le schéma de télé-opération position - position est plus stable que celui en position - force. Dans [H.-Zaad et Salcudean, 1999], les auteurs ont démontré la stabilité du schéma à 3 canaux en présence d'un retard de transmission en appliquant le critère de stabilité de Nyquist. Le même critère a été considéré dans [Fite *et al.*, 2001] pour étudier la stabilité du schéma de télé-opération position - force en absence et présence d'un retard de transmission. La stabilité a été quantifiée en évaluant les marges de gain et de phase. Dans [Çavuşoğlu *et al.*, 2002], des incertitudes sur les modèles représentatifs de l'opérateur et de l'environnement ont été introduites. Un critère de stabilité robuste a alors été utilisé pour prouver la stabilité du schéma de télé-opération.

Mise à la part la possibilité offerte pour quantifier la stabilité d'un schéma de télé-opération, les critères de stabilité des systèmes linéaires ont très souvent été préférés par

rapport au concept de passivité [H.-Zaad et Salcudean, 1999]. En effet et malgré son aspect attractif, la passivité a fréquemment été accusée d'être une approche conservatrice qui limite énormément la transparence du schéma de télé-opération [Kim et Hannaford, 2001]. Le même constat a été fait par Lawrence pour prouver la stabilité du schéma de télé-opération position - position [Lawrence, 1993].

1.2.3.2 Transparence

Pour étudier et comparer la transparence de plusieurs schémas de télé-opération (4 canaux, position - position, avec passivité, ...), Arcara présente de nombreux critères pouvant être utilisés [Arcara, 2001]. Parmi eux, nous en avons retenu deux, chacun lié à un mode de fonctionnement différent du robot esclave. Le premier est **le suivi de trajectoire**. Il correspond au déplacement du robot esclave en espace libre sans contact. Le second correspond à une interaction et une prise de contact avec un objet distant. Il est défini par **l'impédance transmise**.

Le suivi de trajectoire

En espace libre, l'opérateur peut télé-opérer le robot esclave pour atteindre l'objet distant avec lequel il veut interagir pour réaliser un geste dédié comme celui de la suture en chirurgie robotisée par exemple [Madhani *et al.*, 1998]. Dans les deux cas, caractériser le suivi de trajectoire permet de décrire la capacité du manipulateur esclave à reproduire les mouvements de l'opérateur.

Pour atteindre une zone d'intérêt, une erreur de suivi de trajectoire peut être acceptée lorsque l'opérateur possède aussi un retour visuel. Avec un choix adéquat des gains de commande, les schémas de télé-opération dans lesquels le site maître transmet sa position au site esclave (position - position, position - force, ...) garantissent des performances de suivi de trajectoire acceptables [Arcara et Melchiorri, 2002], [Gersem *et al.*, 2005].

Ce critère devient très intéressant lorsqu'il est directement utilisé pour réaliser le retour d'effort à l'opérateur comme par exemple avec le schéma de télé-opération en position - position. Dans ce cas le critère du suivi de trajectoire lui permet alors de percevoir les limitations de l'espace de travail du robot esclave ou encore les interactions que ce dernier peut avoir avec une autre personne distante par exemple. Cependant, dans le cas où le suivi de trajectoire est médiocre, l'opérateur ressent un effort important opposé à ses mouvements. La télé-opération devient alors inconfortable.

L'impédance transmise

Dès que le robot manipulateur entre en contact avec un objet situé dans l'environnement distant, le schéma de télé-opération bilatéral doit renseigner l'opérateur non seulement sur l'état du manipulateur distant mais aussi sur celui de l'objet. La nature de ce dernier est perçue par l'opérateur à travers l'impédance qui lui est transmise par le schéma de télé-opération. Si cette impédance ne représente pas l'objet de contact, l'opérateur ressent des informations biaisées qui peuvent entraîner une mauvaise manipulation.

Dans [Yokokohji et Yoshikawa, 1994], les auteurs définissent la transparence parfaite d'un schéma de télé-opération par une égalité des positions et des efforts

$$\forall t : \begin{cases} X_h(t) = X_s(t) \\ F_{mc}(t) = F_s(t) \end{cases} \quad (1.4)$$

Ceci revient à dire que dans le cas idéal, l'impédance transmise à l'opérateur doit être égale à l'impédance de l'environnement. Le schéma de télé-opération évolue alors d'une

manière transparente pour l'opérateur qui arrive à caractériser l'objet comme s'il agissait directement dessus. Dans [Lawrence, 1993], l'auteur propose le schéma à 4 canaux pour assurer une transparence parfaite du schéma de télé-opération. Il montre aussi qu'une telle performance ne peut pas être atteinte avec les schémas de télé-opération utilisant uniquement deux canaux de transmission tels que le schéma position - position ou le position - force. Sans une étude approfondie et une adaptation de la stratégie de télé-opération, il est même difficile de caractériser la perception de l'opérateur par rapport à l'impédance de l'environnement [Arcara et Melchiorri, 2002]. Nous verrons dans le Chapitre 3 comment caractériser et imposer cette impédance.

1.2.3.3 Le compromis Stabilité/Transparence

Dans [Hannaford, 1989b] et [Lawrence, 1993], les auteurs ont mis en évidence le compromis nécessaire entre la transparence et la stabilité. Ainsi dans ses travaux, Lawrence énonce la nécessité d'utiliser 4 canaux de transmission et des contrôleurs dynamiques pour assurer une transparence parfaite. Cependant, il montre que la passivité du schéma n'est pas toujours assurée. Yokokohji et Yoshikawa [Yokokohji et Yoshikawa, 1994] montrent que grâce à une connaissance parfaite des deux manipulateurs (maître et esclave), une transparence parfaite peut être atteinte mais au détriment d'un faible degré de robustesse.

Dans [Lawrence, 1993], l'auteur propose de faire un compromis entre la stabilité et la transparence en considérant non pas une transparence parfaite mais plutôt une transparence désirée du schéma de télé-opération. Çavuşoğlu *et al* [Çavuşoğlu *et al.*, 2002], considèrent qu'une transparence idéale est celle qui permet une meilleure perception des variations de l'environnement. Ils proposent alors d'étudier la sensibilité de l'impédance transmise par rapport aux variations de l'impédance réelle en mesurant

$$\|W_s \frac{dZ_t}{dZ_e}|_{Z_e=\hat{Z}_e}\|_2, \quad (1.5)$$

où W_s est un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure représente la fréquence à laquelle la transparence n'est plus assurée et $\hat{Z}_e$ est une estimation de l'impédance de l'environnement.

1.3 Contributions

Considérant qu'une des principales limitations des systèmes robotiques dédiés à la chirurgie mini-invasive concerne la mauvaise restitution des efforts au chirurgien lorsqu'il télé-opère le robot chirurgical à distance, nous nous intéresserons donc dans la suite à la mise en œuvre d'un schéma de télé-opération bilatéral permettant au chirurgien de ressentir et de caractériser au mieux les efforts appliqués par ses instruments sur les organes.

Dans ce contexte, les contributions de ce travail de thèse qui seront présentés dans ce manuscrit concernent :

1. La synthèse d'une architecture de télé-opération avec retour d'effort : la plate-forme utilisée sera composée d'une interface haptique (maître) et d'un robot d'expérimentation. Une stratégie de commande en effort basée sur un modèle du robot

esclave et sur un modèle de l'environnement sera utilisée. Des résultats expérimentaux illustreront la robustesse et les performances du schéma de télé-opération choisi (Chapitre 2).

2. La stabilité et la transparence de l'architecture de télé-opération avec retour d'effort : les limitations concernant la stabilité, la transparence et la robustesse du schéma de télé-opération retenu seront mises en évidence. Une estimation en ligne des paramètres d'un modèle simplifié de l'environnement permettra d'accroître la robustesse du système et une adaptation en ligne des paramètres de commande améliorera sa transparence [Zarrad *et al.*, 2007a], [Zarrad *et al.*, 2007c]. Les résultats ainsi que les performances obtenues lors d'une expérimentation sur des tissus *ex-vivo*, illustreront les développements théoriques (Chapitre 3) [Zarrad *et al.*, 2007d].
3. La télé-opération avec retour d'effort et les contraintes imposées par la chirurgie mini-invasive à cœur battant : le schéma de télé-opération proposé précédemment sera étendu à deux contraintes imposées par la chirurgie mini-invasive. Nous nous intéresserons en particulier à (Chapitre 4) :
 - la gestion de la contrainte du passage de l'instrument par un point fixe imposée par la chirurgie mini-invasive. Une stratégie de commande dédiée sera exposée et validée par des résultats expérimentaux [Cortêsão *et al.*, 2006b], [Zarrad *et al.*, 2007b].
 - la compensation des mouvements physiologiques sera abordée en considérant que l'organe en mouvement induit des perturbations périodiques dans les efforts appliqués par l'instrument. Une stratégie d'estimation de ces perturbations à partir des données en effort sera proposée. Les perturbations estimées seront ensuite utilisées pour générer une séquence de commande visant le suivi des mouvements de l'organe en temps-réel. Cette séquence de commande, basée sur le modèle du robot, viendra s'ajouter à la stratégie de commande initialement proposée. Ceci permettra à la fois la commande des efforts appliqués et la compensation des mouvements. Cette approche sera validée sur une plate-forme expérimentale.

Chapitre 2

Télé-opération et commande en effort d'un robot d'assistance au geste chirurgical

Sommaire

2.1	Introduction	29
2.2	La chirurgie mini-invasive et le retour d'effort	30
2.3	Architecture de télé-opération avec retour d'effort	32
2.3.1	Schéma global de télé-opération	32
2.3.2	Commande en effort du système esclave	33
2.3.3	Synthèse du schéma global de télé-opération	43
2.4	Analyse expérimentale	43
2.4.1	Plate-forme expérimentale	43
2.4.2	Résultats expérimentaux	44
2.5	Conclusion	51

2.1 Introduction

Depuis l'introduction du premier système de télé-opération avec retour d'effort en 1954 [Hokayem et Spong, 2006], de nombreux travaux ont porté sur la commande de systèmes mécaniques distants. Les possibilités offertes par un tel système ont suscité un intérêt particulier dans la communauté scientifique qui, au fil du temps et pour diverses applications, a proposé des architectures de télé-opération toutes aussi intéressantes qu'innovantes. Parmi ces architectures, beaucoup permettent de considérer et de minimiser l'effet du retard de la ligne de transmission entre le site local et le site distant [Anderson et Spong, 1989], [Kim *et al.*, 1992], etc En chirurgie mini-invasive, le véritable intérêt des systèmes robotisés n'est pas nécessairement d'opérer à longue distance mais plutôt de rendre les contraintes de l'acte mini-invasif transparentes pour le chirurgien (cf. Chapitre 1). Les expériences menées dans ce domaine et mettant en évidence une longue distance entre le poste de commande du chirurgien et le poste patient, rentrent dans un cadre exceptionnel d'expérimentation. L'intervention réalisée avec le robot **Zeus** entre New York et Strasbourg [Marescaux *et al.*, 2001] ou encore les expériences entre le Japon et la Corée du sud [Arata *et al.*, 2006], sont occasionnelles et ont nécessité des efforts technologiques particuliers pour minimiser les effets du retard de transmission. Elles s'éloignent du cadre de notre travail dans lequel nous supposons que le patient se trouve à

proximité du chirurgien dans la même salle d'opération. La télé-opération s'effectue alors sur une distance de l'ordre de quelques mètres.

Pour développer une architecture de télé-opération avec retour d'effort, nous avons donc mis de côté celles qui ont été développées exclusivement pour obtenir de bonnes performances en présence d'un retard de transmission [Anderson et Spong, 1989]. Nous débuterons alors ce chapitre par une présentation des différentes solutions existantes dédiées à la chirurgie mini-invasive. Notre choix d'architecture en sera inspiré et ensuite développé. Il se base sur un schéma en position - position avec une commande en effort du système esclave. Cette stratégie de commande repose sur un découplage non linéaire du robot esclave et sur des techniques d'observation et de commande par retour d'état. Le reconstruteur d'état utilisé est de type actif capable d'estimer et de compenser les effets des erreurs de modélisation du système esclave. Les performances de cette architecture de télé-opération avec retour d'effort seront finalement discutées et analysées à travers des résultats expérimentaux. Ces derniers seront obtenus à la suite d'une validation expérimentale sur notre plate-forme robotique.

2.2 La chirurgie mini-invasive et le retour d'effort

Madhani *et al* [Madhani *et al.*, 1998] ont été parmi les premiers à proposer une plate-forme de télé-opération dédiée à la chirurgie mini-invasive intégrant un retour d'effort. Le système composé du robot **Black Falcon** et d'une interface haptique de type **PHANToM** utilisait une stratégie de télé-opération bilatérale de type position - position avec une commande Proportionnel-Dérivée (PD) pour les deux manipulateurs. Afin de valider l'architecture de télé-opération, des gestes de suture ont été réalisés sur des tissus *ex-vivo* (poulet). Grâce à l'architecture position - position, une bonne reproduction des gestes a été obtenue. Cependant, le retour haptique et les efforts perçus par l'opérateur étaient différents de ceux appliqués sur les tissus et estimés à partir des couples moteurs.

Dans [Tadano et Kawashima, 2007], un capteur d'effort a été installé au niveau de la station maître d'une architecture de télé-opération position - position. Une stratégie de commande en impédance ne nécessitant pas l'utilisation d'un capteur d'effort, a été choisie pour contrôler le robot esclave. Malgré un retour local des efforts appliqués par l'opérateur, les auteurs n'ont pas pu améliorer les performances de l'architecture lors des interactions avec un environnement. Ils suggèrent que de meilleures performances peuvent être obtenues grâce à la mesure des efforts appliqués par le manipulateur esclave sur son environnement.

Dans [Çavuşoğlu *et al.*, 2001], les auteurs proposent une comparaison de trois architectures de télé-opération bilatérales : position - position, position - force et une architecture hybride position - position avec un retour direct des efforts mesurés. Cette dernière est présentée sur la Figure 2.1(a). Les expériences ont été menées avec deux interfaces haptiques de type **PHANToM** commandées en position. La première, considérée comme maître, commande la deuxième qui applique des efforts sur un objet en silicone contenant une tige métallique. L'étude de la stabilité et de la transparence a mis en évidence l'intérêt de mesurer les efforts appliqués par le manipulateur esclave sur son environnement [Çavuşoğlu, 2000]. L'architecture finalement retenue est l'architecture hybride. Elle assure un bon suivi de trajectoire grâce à la boucle position - position et une meilleure transparence grâce au retour direct des efforts appliqués [Çavuşoğlu *et al.*, 2002]. Cependant, elle ne permet pas de commander les efforts appliqués localement.

Dans [Ortmaier, 2002], l'auteur montre l'importance de contrôler et de percevoir les

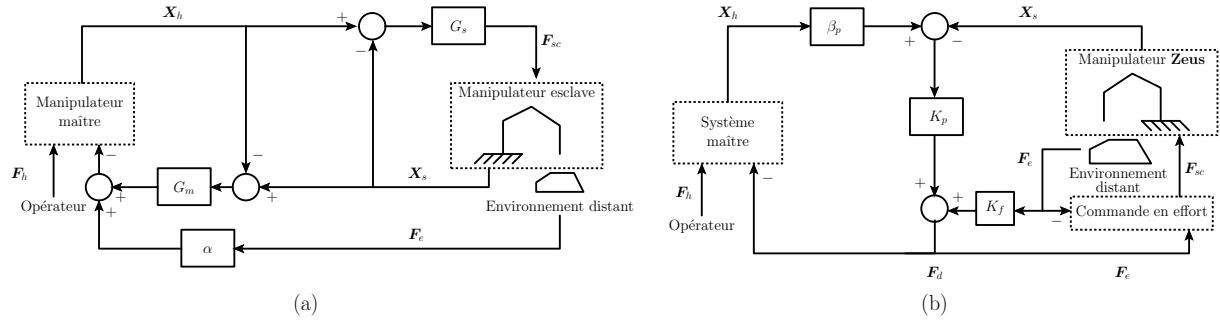


Figure 2.1 - Architectures de télé-opération dédiées à la chirurgie mini-invasive : (a) architecture hybride proposée dans [Çavuşoğlu et al., 2002] et (b) architecture proposée dans [Preusche et al., 2002].

efforts appliqués sur les organes pour assurer une meilleure interaction et limiter le délabrement tissulaire. Il présente alors une plate-forme dédiée à la chirurgie mini-invasive composée d'une interface haptique **PHANToM** et d'un bras esclave **AESOP** sur lequel un capteur d'effort a été fixé (cf. Chapitre 1, §1.1.2.1). L'architecture de télé-opération proposée est illustrée sur la Figure 2.1(b). Elle est très proche de l'architecture hybride mais utilise une commande en effort pour le robot esclave. Cette dernière est basée sur une commande en position dans laquelle les gains sont multipliés par la raideur de l'environnement. Pour garantir sa stabilité, une adaptation des gains suivant une raideur estimée a été proposée.

Pour assurer un bon suivi de trajectoire, Kazerooni *et al* [Kazerooni et al., 1993] ont montré qu'il est essentiel d'utiliser une architecture basée sur celle en position - position ou en position - force. Dans [Zemiti, 2005], l'auteur montre l'apport du retour d'effort en utilisant une architecture en position - force pour télé-opérer le robot **MC²E** (cf. Chapitre 1, Figure 1.7). Cependant, aucune télé-opération en espace libre n'a été réalisée. Comme cela a été mentionné dans le §1.2.2.1 du premier chapitre, cette architecture ne fournit aucune information en effort lors d'une telle manipulation. Or, ce retour d'effort en espace libre, procuré par l'architecture en position - position, peut être très intéressant en chirurgie mini-invasive. Non seulement pour percevoir les mouvements du robot esclave mais aussi pour interagir avec l'équipe médicale lors d'un déplacement manuel de l'effecteur du robot (comportement compliant) ou encore lors d'un changement de l'instrument par exemple. Dans le cas où l'espace de travail du robot esclave est limité à une zone jugée sûre, le retour haptique offre au chirurgien la possibilité de percevoir ces limitations. Cependant, comparée à une stratégie de commande hybride par exemple (Figure 2.1(a)) [Çavuşoğlu, 2000], l'architecture position - position ne permet pas d'avoir de bonnes performances lors d'une interaction avec un environnement (cf. Chapitre 1, §1.2.2). De plus, elle ne permet pas de contrôler les efforts appliqués par le robot esclave comme cela a été suggéré dans [Ortmaier, 2002].

Ainsi pour améliorer ses performances, Cortesão *et al* [Cortesão et al., 2003] proposent une architecture de télé-opération de type position - position modifiée dont l'avantage réside dans la stratégie de commande en effort du robot esclave. Cette architecture, illustrée sur la Figure 2.2, transforme l'erreur en position en un effort désiré que le robot esclave doit appliquer sur son environnement. La commande en effort permet alors de contrôler les efforts appliqués sur les organes en se basant sur un modèle du manipulateur esclave et de l'environnement distant. Conçue pour imposer un comportement dynamique en boucle

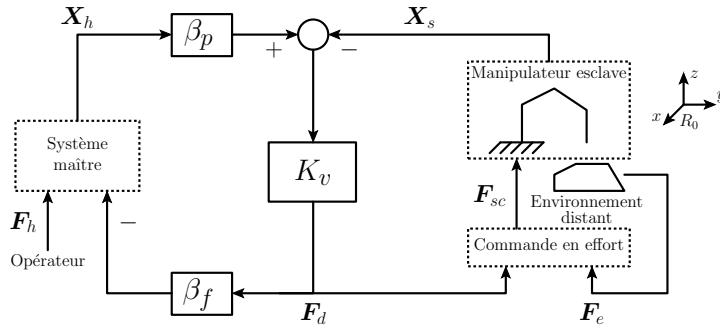


Figure 2.2 - Schéma de télé-opération position - position intégrant une commande en effort du robot esclave [Cortês et al., 2003].

fermée, cette architecture de télé-opération tire profit des performances d'une stratégie position - position tout en intégrant une commande en effort au niveau du manipulateur esclave. Dans un espace libre, l'opérateur ressent les déplacements du robot esclave à travers l'erreur en position (avantage d'une architecture position - position). Lors d'un contact avec un tissu, l'effort appliqué sera identique à celui ressenti et imposé par l'opérateur. Ce dernier pourra alors contrôler l'amplitude de ses gestes et maîtriser les efforts qu'il applique sur les organes.

C'est au regard de ces performances que nous proposons dans le paragraphe suivant, de développer cette architecture ainsi que la commande en effort associée. Nous présentons ensuite des résultats expérimentaux obtenus sur notre plate-forme robotique. À la fin du chapitre, la robustesse de cette architecture de commande face aux variations de l'environnement distant sera discutée à travers des résultats expérimentaux.

2.3 Architecture de télé-opération avec retour d'effort

2.3.1 Schéma global de télé-opération

L'architecture de télé-opération choisie est représentée sur la Figure 2.2. Nous considérons que le retard de transmission entre les deux sites est négligeable par rapport à la période d'échantillonnage des deux manipulateurs. La ligne de transmission des données n'est donc pas représentée. Les variables en position $\mathbf{X}$ et en effort $\mathbf{F}$ sont respectivement des vecteurs des coordonnées opérationnelles généralisées contenant respectivement les positions/orientations et forces/moments suivant et autour des axes x , y et z d'un même repère de base généralement propre au manipulateur esclave. Ce schéma doit être dupliqué, d'une manière indépendante, suivant chaque direction cartésienne.

Sur la Figure 2.2, $\mathbf{F}_h$ est l'effort appliqué par l'opérateur sur l'interface haptique (système maître). Par cet effort, l'opérateur manipule l'interface et modifie la position de celle-ci $\mathbf{X}_h = \mathbf{X}_m$. Afin d'augmenter ($\beta_p > 1$) ou diminuer ($\beta_p < 1$) l'espace de travail du manipulateur esclave par rapport à celui de l'interface maître, la position $\mathbf{X}_m$ est multipliée par un facteur d'échelle β_p . La comparaison de la position résultante avec la position $\mathbf{X}_s$ du manipulateur esclave génère une erreur de position. Cette dernière est multipliée par une raideur virtuelle K_v . La force $\mathbf{F}_d$ qui en découle est considérée, du côté maître comme étant la force du retour d'effort (comme une stratégie en position - position) et du côté esclave comme une force désirée que le manipulateur esclave doit appliquer sur son environnement. Pour prendre en compte les caractéristiques de l'interface haptique telle que la force maximale applicable, la force $\mathbf{F}_d$ est multipliée par un gain β_f avant d'être

appliquée au système maître. Du coté esclave, la force désirée $\mathbf{F}_d$ est appliquée en entrée au système contrôlé en effort.

Pendant un déplacement en espace libre, les efforts mesurés $\mathbf{F}_e$ sont toujours nuls. Si une erreur de position existe ($\beta_p \mathbf{X}_h \neq \mathbf{X}_s$), la stratégie de commande en effort génère une force de commande $\mathbf{F}_{sc}$ qui fera déplacer le robot jusqu'à ce que l'effort désiré (et donc l'erreur en position) devienne nul ($\beta_p \mathbf{X}_h = \mathbf{X}_s$). L'opérateur pourra alors réaliser des déplacements dans un espace libre pendant lesquels il percevra, à travers l'interface haptique, l'erreur en position entre les deux systèmes.

Lors d'un contact, la stratégie de commande en effort utilise la force $\mathbf{F}_e$ appliquée sur l'environnement et mesurée par un capteur d'effort fixé sur le manipulateur esclave, pour générer la force de commande $\mathbf{F}_{sc}$. La stratégie de commande en effort contrôle alors l'évolution de la force mesurée $\mathbf{F}_e$ pour qu'elle converge vers la force désirée $\mathbf{F}_d$ avec la dynamique désirée. Si l'effort appliqué par le manipulateur esclave $\mathbf{F}_e$ est égal à $\mathbf{F}_d$, l'opérateur aura une bonne perception des interactions entre le robot esclave et son environnement. Ainsi, la stratégie de commande en effort devient un élément central dans la synthèse de ce schéma de télé-opération.

2.3.2 Commande en effort du système esclave

La commande en effort utilisée dans le schéma de télé-opération présenté précédemment, est une stratégie de commande référencée modèle. Elle se base sur un découplage non linéaire du robot esclave permettant d'avoir à contrôler un ensemble de systèmes linéaires parfaitement découplés si les paramètres du modèle sont parfaitement estimés. La mise sous forme de représentation d'état de ces systèmes permet alors de définir un observateur d'état. L'estimation de l'état est utilisée pour effectuer une commande par retour d'état [Ogata, 2002].

Dans ce paragraphe, nous présentons de façon synthétique la commande en effort proposée dans [Cortês, 2002] et qui sera la base de notre architecture de télé-opération.

2.3.2.1 Modélisation du site distant

Considérons un robot à n degrés de liberté (ddl). Nous supposons qu'un capteur d'effort est rigidement fixé entre le robot et son organe terminal. Ce capteur fournit une mesure des efforts que le robot exerce sur son environnement. Selon une direction opérationnelle j donnée, le robot, le capteur d'effort et l'environnement sont supposés former un système de raideur $K_{s,j}$. Ce système est la mise en série de trois éléments parmi lesquels le robot et le capteur d'effort sont considérés rigides par rapport à l'environnement. La raideur totale $K_{s,j}$ du système est donc très proche de celle de l'environnement avec lequel le robot se trouve en contact.

Soit $\mathbf{X}_s$ le vecteur des coordonnées cartésiennes généralisées de l'extrémité de l'outil défini dans le repère de base R_0 du robot. $\mathbf{X}_s$ contient les positions et les orientations de l'outil du manipulateur esclave suivant et autour des axes opérationnels x , y et z de R_0 . Ce vecteur est donné par

$$\mathbf{X}_s = \begin{bmatrix} X_{s,x} \\ X_{s,y} \\ \vdots \\ X_{s,\theta_z} \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

$\mathbf{X}_s$ est de dimension $(m \times 1)$ où m est égal au nombre de degrés de liberté opérationnels du robot. Selon un de ces degrés de liberté j , nous supposons que l'effort (et le moment) exercé par le robot sur son environnement est

$$F_{e,j} = K_{s,j} X_{s,j}. \quad (2.2)$$

Nous définissons alors le vecteur $\mathbf{F}_e$ de dimension $(m \times 1)$ des efforts/moments appliqués par le robot esclave sur son environnement. Il est exprimé dans le repère R_0 .

Le vecteur des positions articulaires généralisées $\mathbf{q}$ de dimension $(n \times 1)$ est donné par

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Soit $\mathbf{X}_s = \mathbf{g}(\mathbf{q})$ le modèle géométrique du robot. Le modèle cinématique reliant les vitesses articulaires $\dot{\mathbf{q}}$ aux vitesses cartésiennes $\dot{\mathbf{X}}_s$ est défini par

$$\dot{\mathbf{X}}_s = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}, \quad (2.4)$$

où $\mathbf{J}$ est la matrice jacobienne de dimension $(m \times n)$ du robot esclave, donnée par

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{q}}. \quad (2.5)$$

Le comportement dynamique du robot dépend du vecteur de commande des couples (et/ou forces) moteurs $\boldsymbol{\tau}_{sc}$. Il est décrit par

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_{sc}, \quad (2.6)$$

où $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ de dimension $(n \times n)$ est la matrice d'inertie du robot, les vecteurs $\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ et $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ sont de dimension $(n \times 1)$ et représentent respectivement les couples/forces de Coriolis et forces centrifuges et les couples/forces de gravité. Au vecteur de couples $\boldsymbol{\tau}_{sc}$ correspond un vecteur d'efforts de commande $\mathbf{F}_{sc}$ dans l'espace opérationnel. Ce vecteur d'efforts de dimension $(m \times 1)$ est exprimé dans le repère R_0 . Il est relié au couple de commande $\boldsymbol{\tau}_{sc}$ par la matrice jacobienne $\mathbf{J}$ suivant

$$\boldsymbol{\tau}_{sc} = \mathbf{J}^T \mathbf{F}_{sc}. \quad (2.7)$$

Les accélérations articulaires $\ddot{\mathbf{q}}$ sont déterminées en fonction des accélérations cartésiennes de l'outil $\ddot{\mathbf{X}}_s$ en dérivant la relation (2.4). Elles sont données par

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}}_s - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}), \quad (2.8)$$

où $\mathbf{J}^{-1}$ est l'inverse de la matrice jacobienne $\mathbf{J}$. Lorsque le robot est redondant ($m \neq n$), il suffit de remplacer dans la relation (2.8) $\mathbf{J}^{-1}$ par une inverse généralisée [Khalil et Dombre, 1999].

En introduisant les relations (2.7) et (2.8) dans (2.6) et en considérant le vecteur des efforts/moments extérieurs $\mathbf{F}_e$ que le robot esclave exerce sur son environnement, le modèle dynamique du robot esclave s'exprime dans l'espace cartésien par

$$\mathbf{M}_x(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{X}}_s + \mathbf{V}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}_x(\mathbf{q}) = \mathbf{F}_{sc} - \mathbf{F}_e, \quad (2.9)$$

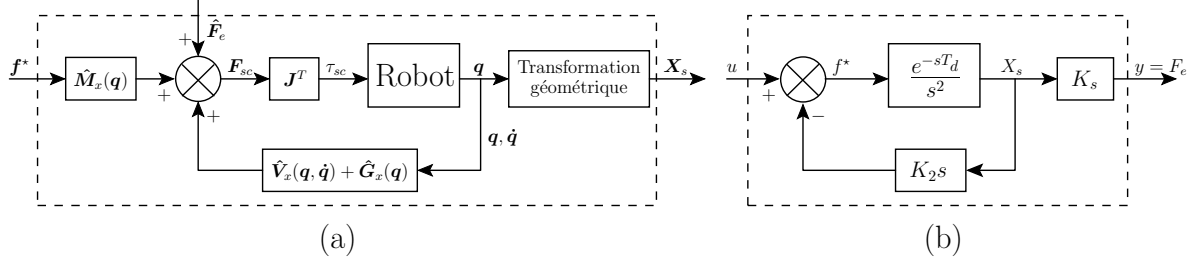


Figure 2.3 - Commande dynamique et système linéarisé pour chaque direction opérationnelle : (a) commande dynamique du robot esclave et découplage non linéaire et (b) modèle linéaire en effort du robot esclave suivant une direction donnée de l'espace opérationnel.

où

$$M_x = J^{-T} M(q) J^{-1}, \quad (2.10)$$

$$V_x = J^{-T} V(q, \dot{q}) - M_x \dot{J} \dot{q} \quad (2.11)$$

et

$$G_x = J^{-T} G(q). \quad (2.12)$$

Dans les équations (2.9)-(2.12), M_x est de dimension $(m \times m)$ et les deux vecteurs V_x et G_x sont de dimension $(m \times 1)$.

Soient $\hat{M}_x$, $\hat{V}_x$, $\hat{G}_x$ et $\hat{F}_e$ les estimations respectives de M_x , V_x , G_x et F_e supposées parfaites. En choisissant un effort F_{sc} tel que [Khalil et Dombre, 1999]

$$F_{sc} = \hat{M}_x(q) f^* + \hat{V}_x(q, \dot{q}) + \hat{G}_x(q) + \hat{F}_e, \quad (2.13)$$

la commande du robot esclave se réduit à la commande de m systèmes linéaires, invariants, découplés et du second ordre décrits dans le temps par :

$$\ddot{X}_s(t) = f^*(t - T_d), \quad (2.14)$$

où f^* est un vecteur de dimension $(m \times 1)$ homogène à un effort de commande. T_d est le retard propre du robot dû au temps de traitement des informations des capteurs, à l'envoi de la commande ou encore au temps de réaction des articulations.

La Figure 2.3(a) montre une représentation schématique du découplage non linéaire d'un robot dans l'espace cartésien. Ce découplage transforme un problème de commande d'un système non-linéaire (2.9) en un problème de commande de m systèmes linéaires, découplés et en doubles intégrateurs [Khatib, 1980]. Afin de pré-stabiliser chacun des systèmes obtenus, nous réalisons une boucle interne de vitesse avec une matrice de gain diagonale K_2 . Ce retour assure une meilleure robustesse face aux erreurs de modélisation et aux incertitudes inévitables liées à l'estimation des paramètres dynamiques du robot.

Le modèle en effort du système est établi en considérant le retard propre du robot, le retour en vitesse et la matrice diagonale de raideur K_s de l'environnement. Ce modèle est défini indépendamment pour chaque direction opérationnelle. Pour simplifier les écritures, nous admettons alors que les variables X_s , F_e , f^* , K_s et K_2 représentent respectivement les composantes, selon une direction donnée, des vecteurs X_s , F_e , f^* , K_s et K_2 . Ce modèle, représenté sur la Figure 2.3(b), relie une entrée de commande u à l'effort F_e appliqué par le robot sur son environnement. La fonction de transfert équivalente est donnée par :

$$G(s) = \frac{K_s e^{-sT_d}}{s(s + K_2 e^{-sT_d})} \quad (2.15)$$

avec s l'opérateur de Laplace. En considérant un retard T_d faible, G s'écrit :

$$G(s) \approx \frac{K_s e^{-sT_d}}{s(s + K_2)}. \quad (2.16)$$

Soit $K_{s,n}$ la raideur nominale de l'environnement dont la valeur réelle K_s est *a priori* inconnue. La représentation temporelle du modèle s'écrit

$$\ddot{y}(t) + K_2 \dot{y}(t) = K_{s,n} u(t - T_d), \quad (2.17)$$

où $y(t)$ représente l'effort F_e appliqué par le robot sur son environnement, u désigne la variable d'entrée homogène à un effort de commande. En définissant deux variables d'état $x_1(t) = y(t)$ et $x_2(t) = \dot{y}(t)$, la représentation d'état du système est

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_{s,n} \end{bmatrix} u(t - T_d) \quad (2.18)$$

que nous écrivons sous forme compacte

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t - T_d) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases}. \quad (2.19)$$

Considérons que le système (2.19) est précédé d'un bloqueur d'ordre zéro et que la sortie est échantillonnée à la fréquence $1/h$, sa représentation d'état discrète est donnée par

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{r,k} = \Phi_r \mathbf{x}_{r,k-1} + \Gamma_r u_{k-1} \\ y_k = \mathbf{C}_r \mathbf{x}_{r,k} \end{cases} \quad (2.20)$$

avec

$$T_d = (d - 1)h + \tau', \quad (2.21)$$

$$0 < \tau' \leq h, \quad (2.22)$$

$$\mathbf{x}_{r,k} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k^T & u_{k-d} & \dots & u_{k-2} & u_{k-1} \end{bmatrix}^T, \quad (2.23)$$

$$\Phi_r = \begin{bmatrix} \Phi_1 & \Gamma_1 & \Gamma_0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

$$\Gamma_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2.25)$$

et

$$\mathbf{C}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

Les matrices Φ_1 , Γ_1 et Γ_0 sont respectivement définies par :

$$\Phi_1 = e^{\mathbf{A}h} = \phi(h), \quad (2.27)$$

$$\Gamma_0 = \int_0^{h-\tau'} \phi(\lambda) d\lambda \mathbf{B} \quad (2.28)$$

et

$$\Gamma_1 = \phi(h - \tau') \int_0^{\tau'} \phi(\lambda) d\lambda \mathbf{B}, \quad (2.29)$$

où $\phi(\cdot)$ représente la matrice de transition de l'état exprimée en temps continu par

$$\phi(t) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1 - e^{-K_2 t}}{K_2} \\ 0 & e^{-K_2 t} \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

Les expressions analytiques des matrices Φ_1 , Γ_1 et Γ_0 sont obtenues à partir des équations (2.27)-(2.30) en considérant $\tau' = h$. Elles sont respectivement données par

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1 - e^{-K_2 h}}{K_2} \\ 0 & e^{-K_2 h} \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} \frac{K_{s,n}}{K_2^2} (K_2 h - 1 + e^{-K_2 h}) \\ \frac{K_{s,n}}{K_2} (1 - e^{-K_2 h}) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

et

$$\Gamma_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (2.33)$$

Dans la représentation d'état discrète (2.20), le vecteur d'état $\mathbf{x}_{r,k}$ est de dimension $((2+d) \times 1)$. Les deux premiers états représentent respectivement la force appliquée F_e et sa dérivée. Les d autres états sont dus au retard T_d propre au système. Les dimensions des matrices Φ_r , Γ_r et $\mathbf{C}_r$ sont respectivement $((2+d) \times (2+d))$, $((2+d) \times 1)$ et $(1 \times (2+d))$. Il est à remarquer que, uniquement deux éléments de la matrice d'état Φ_r (deux éléments du vecteur Γ_1) dépendent de la raideur nominale $K_{s,n}$. Pour faciliter les développements présentés dans la suite de ce manuscrit (Chapitre 3), nous posons

$$\Gamma_1 = K_{s,n} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

avec

$$\gamma_1 = \frac{K_2 h - 1 + e^{-K_2 h}}{K_2^2} \text{ et } \gamma_2 = \frac{1 - e^{-K_2 h}}{K_2}. \quad (2.35)$$

Le système esclave a ainsi été modélisé. À partir de sa représentation d'état, une commande en effort par retour d'état peut être établie. L'intérêt de cette stratégie de commande réside dans la prise en compte de la référence de consigne r_k et de toutes les variables d'état, supposées dans un premier temps connues, du système afin d'imposer une dynamique et un comportement désiré en boucle fermée [Ogata, 2002]. Dans le paragraphe suivant, nous présenterons cette loi de commande.

2.3.2.2 Synthèse de la commande par retour d'état

Soit le système esclave à commander dont le modèle en boucle ouverte est donné par la représentation d'état (2.20)-(2.33). En supposant dans un premier temps que toutes les composantes du vecteur d'état $\mathbf{x}_{r,k}$ sont accessibles et mesurables, la commande par retour d'état s'exprime par

$$u_{k-1} = r_{k-1} - \mathbf{L}_r \mathbf{x}_{r,k-1}, \quad (2.36)$$

où r_{k-1} et $\mathbf{L}_r$ sont respectivement l'entrée de référence en effort et le gain du retour d'état de dimension $(1 \times (2+d))$.

La représentation d'état du système en boucle fermée est alors

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{r,k} = (\mathbf{\Phi}_r - \mathbf{\Gamma}_r \mathbf{L}_r) \mathbf{x}_{r,k-1} + \mathbf{\Gamma}_r r_{k-1} \\ y_k = \mathbf{C}_r \mathbf{x}_{r,k-1} \end{cases}, \quad (2.37)$$

dont le gain statique k_s est donné par

$$k_s = \mathbf{C}_r (\mathbf{I}_{(2+d) \times (2+d)} - (\mathbf{\Phi}_r - \mathbf{\Gamma}_r \mathbf{L}_r))^{-1} \mathbf{\Gamma}_r. \quad (2.38)$$

La synthèse du correcteur par retour d'état consiste à déterminer le gain $\mathbf{L}_r$, afin d'imposer la dynamique du système en boucle fermée. Ainsi, nous choisissons une réponse en effort appliqué $y_k = F_e$ qui présente :

- un régime transitoire critique apériodique avec une constante de temps T_{cl} ,
- un régime permanent avec une erreur statique nulle.

Le polynôme caractéristique du système en boucle fermée correspondant s'écrit alors

$$P(z) = z^d(z^2 + a_1 z + a_2), \quad (2.39)$$

où

$$a_1 = -2e^{-\zeta w_n h} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} w_n h) \quad (2.40)$$

et

$$a_2 = e^{-2\zeta w_n h}. \quad (2.41)$$

ζ et w_n sont respectivement le facteur d'amortissement et la pulsation propre du système. Ils sont donnés par :

$$\zeta = 1 \quad \text{et} \quad w_n = \frac{1}{T_{cl}}. \quad (2.42)$$

Le gain du retour d'état $\mathbf{L}_r$ est alors calculé suivant la méthode de placement de pôles d'Ackermann basée sur le modèle du système en boucle ouverte ($\mathbf{\Phi}_r$ et $\mathbf{\Gamma}_r$), la matrice de commandabilité et le polynôme caractéristique désiré en boucle fermée [Ogata, 2002]. $\mathbf{L}_r$ est donné par :

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{W}_c^{-1} \mathbf{P}(\mathbf{\Phi}_r), \quad (2.43)$$

où $\mathbf{W}_c$ est la matrice de commandabilité donnée par :

$$\mathbf{W}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{\Gamma}_r & \mathbf{\Phi}_r \mathbf{\Gamma}_r & \cdots & \mathbf{\Phi}_r^{(d+2)-1} \mathbf{\Gamma}_r \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

et $\mathbf{P}(\mathbf{\Phi}_r)$ est le polynôme caractéristique (2.39) en $\mathbf{\Phi}_r$. Il est exprimé par :

$$\mathbf{P}(\mathbf{\Phi}_r) = \mathbf{\Phi}_r^d (\mathbf{\Phi}_r^2 + a_1 \mathbf{\Phi}_r + a_2). \quad (2.45)$$

Pour imposer un gain statique unitaire, la référence r_{k-1} est choisie

$$r_{k-1} = k_s^{-1} F_d = L_1 F_d. \quad (2.46)$$

Le développement des relations (2.43) et (2.46)) montre que L_1 est égal au premier élément de $\mathbf{L}_r$ dont seuls les deux premiers éléments dépendent de la raideur nominale $K_{s,n}$. Nous posons alors

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & \cdots & L_{d+2} \end{bmatrix}, \quad (2.47)$$

avec

$$L_1 = \frac{l_1}{K_{s,n}} \quad \text{et} \quad L_2 = \frac{l_2}{K_{s,n}}. \quad (2.48)$$

D'après les relations (2.37), (2.43) et (2.46), lorsque le robot esclave est en contact avec son environnement, la fonction de transfert en boucle fermée $G_{cl}(s)$ qui décrit l'évolution de l'effort appliqué par le robot F_e par rapport à l'effort désiré F_d est

$$G_{cl} = \frac{F_e}{F_d} = \frac{1}{(1 + T_{cl}s)^2} e^{-sT_d}. \quad (2.49)$$

Dans la synthèse de la stratégie de commande par retour d'état, nous avons supposé que toutes les composantes de l'état $\mathbf{x}_{r,k}$ du système esclave étaient mesurables, ce qui peut s'avérer coûteux et/ou physiquement impossible à réaliser. Dans le paragraphe suivant, nous développerons alors un observateur (ou reconstituteur) de l'état capable de fournir une estimation $\hat{\mathbf{x}}_{r,k}$ du vecteur d'état du système. L'observateur qui sera proposé est un observateur actif (AOB¹) qui réalise non seulement l'estimation de l'état mais aussi celle des erreurs de modélisation [Cortésão, 2002]. La compensation de ces erreurs permet d'assurer de meilleures performances et une plus grande robustesse de la stratégie de commande élaborée précédemment.

2.3.2.3 Observateur actif de l'état

Un observateur actif de l'état reformule une stratégie d'estimation d'état tout en tenant compte des erreurs de modélisation du système. Ces erreurs apparaissent suite à une modélisation structurellement erronée ou à une incertitude paramétrique sur $K_{s,n}$, $\hat{\mathbf{M}}_x$, $\hat{\mathbf{V}}_x$ ou encore $\hat{\mathbf{G}}_x$ par exemple. L'observateur réalise alors une estimation de ces erreurs afin de minimiser leur effet sur la stratégie de commande du système.

Dans la suite, nous présenterons le principe général de l'observateur actif de l'état. Dans cette présentation, nous mettrons en évidence les limitations d'un observateur "classique" de l'état vis-à-vis des erreurs de modélisation. L'intérêt d'un observateur actif de l'état sera alors démontré avant de présenter sa mise en œuvre pour la commande en effort du site esclave.

Principe

Un observateur "classique" de l'état du système esclave (2.20)-(2.33) est un modèle d'état établi suivant la représentation d'état en boucle ouverte du système [Ogata, 2002]. Il est de la forme

$$\hat{\mathbf{x}}_{r,k} = \Phi_r \hat{\mathbf{x}}_{r,k-1} + \Gamma_r u_{k-1} + \mathbf{E}_k (y_k - \hat{y}_k), \quad (2.50)$$

avec

$$\hat{y}_k = \mathbf{C}_r (\Phi_r \hat{\mathbf{x}}_{r,k-1} + \Gamma_r u_{k-1}) \quad (2.51)$$

dans laquelle $\mathbf{E}_k$ est le gain, de dimension $((2 + d) \times 1)$, d'estimation de l'état. Ce gain peut être calculé selon le procédé de Kalman [Kalman, 1960] ou celui de Luenberger [Luenberger, 1966] afin que l'erreur d'estimation $\mathbf{e}_{r,k}$, donnée par

$$\mathbf{e}_{r,k} = \mathbf{x}_{r,k} - \hat{\mathbf{x}}_{r,k}, \quad (2.52)$$

converge vers 0 quand k tend vers l'infini.

Puisque le vecteur d'état $\mathbf{x}_{r,k}$ du système est non totalement mesurable, la commande par retour d'état s'établit en fonction du vecteur d'état estimé $\hat{\mathbf{x}}_{r,k}$ fourni par l'observateur (2.50)-(2.51). La loi de commande u_{k-1} donnée par (2.36) devient alors :

$$u_{k-1} = r_{k-1} - \mathbf{L}_r \hat{\mathbf{x}}_{r,k-1}, \quad (2.53)$$

¹pour *Active Observer*

En présence d'erreurs de modélisation, cette entrée de commande u_{k-1} (2.53) peut être réécrite sous la forme

$$u_{k-1} = r_{k-1} - \mathbf{L}_r \mathbf{x}_{r,k-1} + \mathbf{L}_r \mathbf{e}_{r,k-1}. \quad (2.54)$$

Dans cette expression, les erreurs d'estimation $\mathbf{e}_{r,k}$, non considérées dans la synthèse du gain $\mathbf{L}_r$, sont mises en évidence. Ces erreurs, dues à des erreurs de modélisation du système, sont appliquées à l'entrée du système à travers le retour d'état et peuvent ainsi affecter et dégrader les performances désirées de la stratégie de commande. Dans ces conditions, la représentation d'état du système en boucle fermée devient

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{r,k} = (\Phi_r - \Gamma_r \mathbf{L}_r) \mathbf{x}_{r,k-1} + \Gamma_r r_{k-1} + \Gamma_r \mathbf{L}_r \mathbf{e}_{r,k-1} \\ y_k = \mathbf{C}_r \mathbf{x}_{r,k-1} \end{cases} \quad (2.55)$$

Une telle stratégie de commande par retour d'état estimé utilisant un observateur "classique" de l'état, est illustrée sur la Figure 2.4(a).

Un observateur actif de l'état estime ces erreurs de modélisation en les regroupant dans un état supplémentaire, appelé état actif, noté p_k et donné par :

$$p_k = \mathbf{L}_r \mathbf{e}_{r,k}. \quad (2.56)$$

Cette observateur, illustré sur la Figure 2.4(b), est établi suivant la représentation d'état désirée du système en boucle fermée [Cortezão, 2002]. La compensation des erreurs de modélisation qui apparaissent à l'entrée du système se réalise alors en incluant dans le retour d'état l'estimation $\hat{p}_k$ de p_k . La représentation d'état en boucle fermée du système esclave suivant laquelle l'observateur actif sera établi est alors (cf. Figure 2.4(b))

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{r,k} \\ p_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_r & \Gamma_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{r,k-1} \\ p_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_r \\ 0 \end{bmatrix} u_{k-1} \quad (2.57)$$

avec une commande par retour d'état u_{k-1} donnée par

$$u_{k-1} = r_{k-1} - \begin{bmatrix} \mathbf{L}_r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{r,k-1} \\ \hat{p}_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (2.58)$$

En considérant $\hat{p}_k = p_k$, cette représentation d'état est identique à la représentation d'état désirée en boucle fermée donnée par (2.37).

La synthèse de l'observateur actif est basée sur l'utilisation d'un filtre de Kalman où l'état actif est introduit. Le choix de ce filtre est justifié par le fait qu'il permet une bonne estimation de la sortie du système en présence de bruits, supposés blancs, sur la mesure et sur le modèle [Jazwinski, 1970], [Cortezão, 2002]. Dans ces conditions, il assure une estimation à variance minimale de la sortie (et de l'état lorsque le modèle est parfait). Sa mise en œuvre est présentée dans le paragraphe suivant.

Mise en œuvre

Nous avons considéré un observateur actif d'ordre 1. Il se caractérise par un état actif p_k défini selon une equation aux récurrences d'ordre 1 donnée par :

$$p_k = p_{k-1} + {}^0w_k, \quad (2.59)$$

où 0w_k est un bruit blanc Gaussien de moyenne nulle et de matrice de covariance définie positive Q_{p_k} donnée par

$$E[{}^0w_k {}^0w_j^T] = Q_{p_k} \delta_{kj}, \quad (2.60)$$

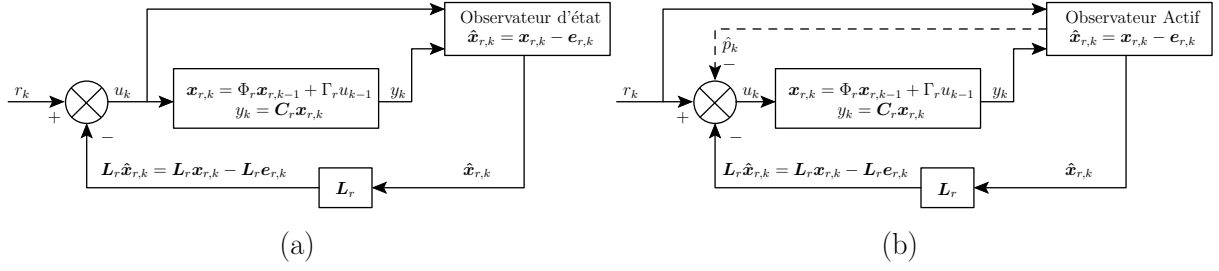


Figure 2.4 - *Stratégie de commande d'estimation et de commande par retour d'état estimé* : (a) *stratégie utilisant un observateur "classique" de l'état* et (b) *stratégie utilisant un observateur actif de l'état avec compensation des erreurs de modélisation*.

où $E[\cdot]$ désigne l'espérance mathématique et

$$\delta_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{si } k = j \\ 0 & \text{si } k \neq j \end{cases} \quad (2.61)$$

δ_{kj} exprime le fait que la valeur de la variable de bruit 0w_j prise à l'instant j est totalement indépendante de la valeur 0w_k prise à l'instant k .

La représentation d'état discrète du système esclave incluant l'état actif p_k s'écrit alors (cf. relation (2.57))

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{r,k} \\ p_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_r & \Gamma_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{r,k-1} \\ p_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_r \\ 0 \end{bmatrix} u_{k-1} + \begin{bmatrix} \xi_{\mathbf{x}_{r,k}} \\ {}^0w_k \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

et

$$y_k = \mathbf{C}_a \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{r,k-1}^T & p_{k-1} \end{bmatrix}^T + \eta_{y_k}. \quad (2.63)$$

Les entrées $\xi_{\mathbf{x}_{r,k}}$ et η_{y_k} sont des bruits blancs Gaussiens, indépendants, de moyennes nulles, de dimensions respectives $((2+d) \times 1)$ et (1×1) et dont les covariances respectives sont définies positives et données par

$$E[\xi_{\mathbf{x}_{r,k}} \xi_{\mathbf{x}_{r,j}}^T] = \mathbf{Q}_{\mathbf{x}_{r,k}} \delta_{kj} \quad \text{et} \quad E[\eta_{y_k} \eta_{y_j}^T] = R_k \delta_{kj} \quad (2.64)$$

avec $\mathbf{Q}_{\mathbf{x}_{r,k}}$ une matrice diagonale. $\mathbf{Q}_{\mathbf{x}_{r,k}}$ et R_k représentent respectivement les incertitudes apportées au modèle et à sa sortie mesurée $y_k = F_e$. Soit $\mathbf{Q}_k$ la matrice de covariance du vecteur de bruit $\xi_k = [\xi_{\mathbf{x}_{r,k}}^T \quad {}^0w_k]^T$ agissant sur l'état étendu $[\mathbf{x}_{r,k}^T \quad p_k]^T$

$$E[\xi_k \xi_j^T] = \mathbf{Q}_k \delta_{kj} \quad \text{où} \quad \mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\mathbf{x}_{r,k}} & 0 \\ 0 & R_k \end{bmatrix}. \quad (2.65)$$

La mise en œuvre expérimentale de la stratégie d'estimation en sera fortement dépendante comme nous le verrons au §2.4.

En considérant la commande par retour d'état estimé

$$u_{k-1} = r_{k-1} - \begin{bmatrix} \mathbf{L}_r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{r,k-1} \\ \hat{p}_{k-1} \end{bmatrix}, \quad (2.66)$$

l'observateur actif établi selon le modèle désiré en boucle fermée s'écrit

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{r,k} \\ \hat{p}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_r - \Gamma_r \mathbf{L}_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{r,k-1} \\ \hat{p}_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_r \\ 0 \end{bmatrix} r_{k-1} + \mathbf{K}_k (y_k - \hat{y}_k), \quad (2.67)$$

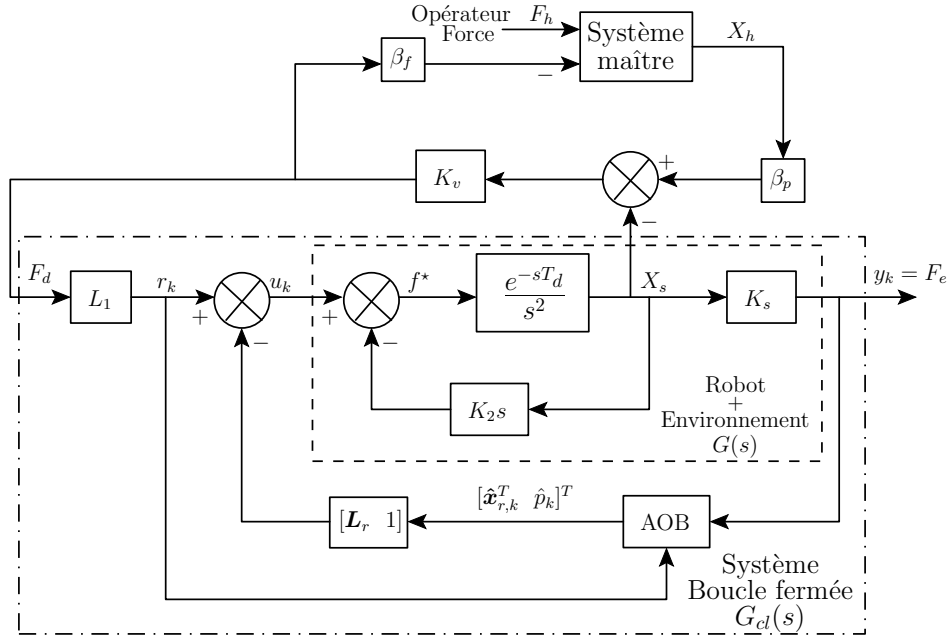


Figure 2.5 - Architecture de télé-opération et stratégie de commande en effort intégrant un observateur actif de l'état AOB et une technique de commande par retour d'état.

avec

$$\hat{y}_k = C_a \left(\begin{bmatrix} \Phi_r - \Gamma_r L_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{r,k-1} \\ \hat{p}_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_r \\ 0 \end{bmatrix} r_{k-1} \right) \quad (2.68)$$

et

$$C_a = \begin{bmatrix} C_r & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.69)$$

Le gain d'estimation de Kalman K_k de dimension $((2+d+1) \times 1)$, qui reflète les incertitudes associées à chaque composante du vecteur d'état $[\hat{x}_{r,k}^T \hat{p}_k]^T$ et à la sortie mesurée $y_k = F_e$ [Cortês, 2002], est donné par

$$K_k = P_{1k} C_a^T [C_a P_{1k} C_a^T + R_k]^{-1}, \quad (2.70)$$

avec

$$P_{1k} = \Phi_n P_{k-1} \Phi_n^T + Q_k \quad (2.71)$$

et

$$P_k = P_{1k} - K_k C_a P_{1k}. \quad (2.72)$$

Φ_n représente la matrice d'état en boucle ouverte du système à observer (2.62). Elle est donnée par :

$$\Phi_n = \begin{bmatrix} \Phi_r & \Gamma_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.73)$$

Les matrices P_{1k} et P_k sont respectivement les matrices de covariance de l'erreur de prédiction et d'estimation associées à l'état $[\hat{x}_{r,k}^T \hat{p}_k]^T$ avant et après correction par le gain K_k dans (2.67). La valeur initiale P_0 traduit la confiance accordée à l'état initial $[\hat{x}_{r,0}^T \hat{p}_0]^T$. Plus les valeurs de P_0 sont élevées moins cette confiance est grande.

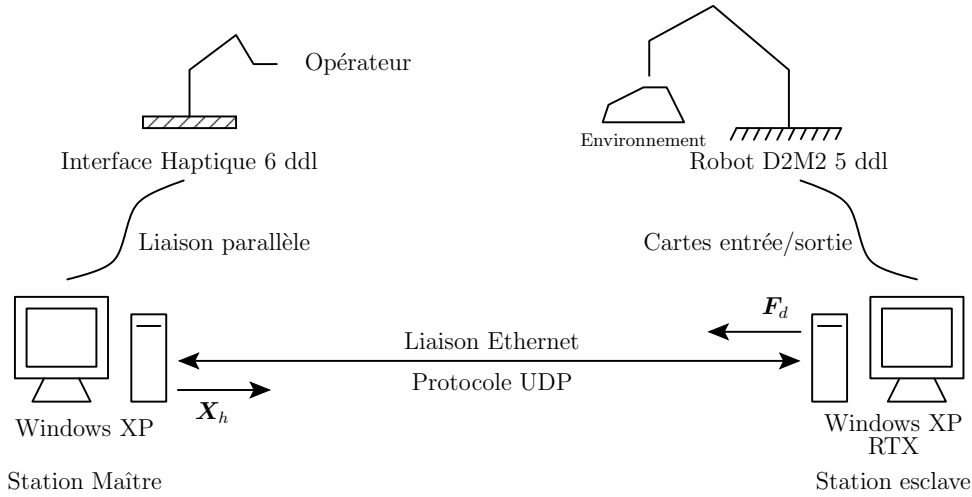


Figure 2.6 - Représentation schématique de la plate-forme expérimentale.

2.3.3 Synthèse du schéma global de télé-opération

La Figure 2.5 illustre l'architecture de télé-opération incluant l'observateur actif de l'état et la stratégie de commande par retour d'état selon chaque direction opérationnelle.

2.4 Analyse expérimentale

2.4.1 Plate-forme expérimentale

L'architecture de télé-opération a été validée expérimentalement sur une plate-forme robotique constituée de deux stations, maître et esclave, communiquant via une liaison réseau Ethernet et un protocole de communication de type UDP. Les données échangées (position et effort) sont toutes de dimension (3×1) représentant une télé-opération selon les trois directions de déplacement x , y et z d'un repère R_0 propre au manipulateur esclave. Une représentation schématique de la plate-forme expérimentale est donnée sur la Figure 2.6.

La station maître est constituée d'un bras maître à retour d'effort de type **PHANToM 1.5** de SensAble Technologies (Figure 2.7(a)). Cette interface haptique est un robot manipulateur à 6 ddl tous motorisés. Elle permet ainsi l'application d'un effort (et d'un moment) suivant (et autour) les trois directions de son espace opérationnel. La faible masse des bras qui la constituent, son architecture mécanique et ses articulations à très faible frottements permettent à un opérateur de manipuler son effecteur avec une bonne aisance même si elle n'est pas réellement adaptée à la chirurgie mini-invasive. Lors de l'application d'un effort, elle lui paraît totalement transparente permettant ainsi un rendu haptique de bonne qualité. L'interface haptique est connectée à un ordinateur sous Windows XP communiquant via une liaison de type parallèle. Un processus cyclique à 1 [ms] (1 [KHz]) gère le fonctionnement de l'interface haptique en faisant appel aux fonctions de la bibliothèque Ghost fournies avec le **PHANToM**. L'interface haptique envoie la position cartésienne de son effecteur et reçoit les efforts et les moments qu'elle reproduit.

En manipulant le bras haptique, l'opérateur télé-opère le robot esclave **D2M2**². Ce robot, illustré sur la Figure 2.7(b), est un manipulateur de type SCARA série à 5 ddl

²pour *Direct Drive Modular Manipulator*.

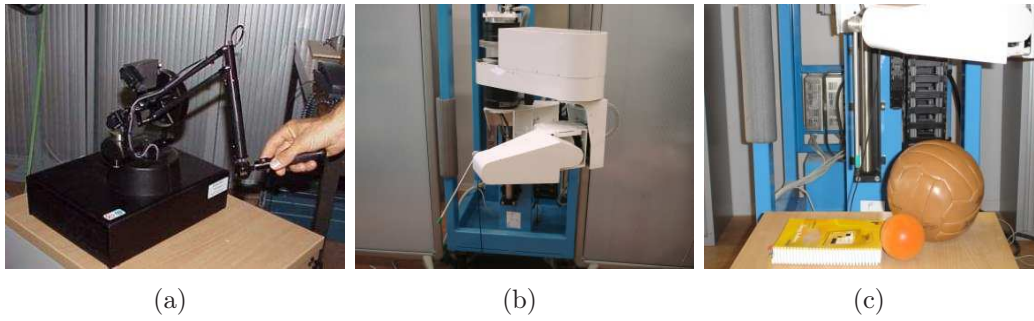


Figure 2.7 - *Plate-forme expérimentale* : (a) *interface haptique maître PHANTOM 1.5*, (b) *robot manipulateur esclave D2M2* et (c) *environnement distant*.

capable de se déplacer selon les trois directions x , y et z et de s'orienter autour des axes x et y d'un même repère R_0 lié à sa base fixe. Son modèle est donné en Annexe A. Il possède une articulation prismatique et quatre articulations rotoïdes toutes actionnées par des moteurs à entraînement direct. Ce type d'actionnement limite les jeux et les frottements au niveau des articulations, offre une grande dynamique de déplacement et ainsi une meilleure transparence par rapport aux efforts appliqués sur l'environnement. De plus, ne comportant pas de réducteurs, ces actionneurs permettent d'avoir un robot totalement réversible qui tolère des interactions manuelles avec un utilisateur extérieur (changement de posture, déplacement de l'effecteur vers une position désirée, dégagement en cas de panne, etc ...). Un entraînement par courroie a permis de déporter les actionneurs à proximité de la première articulation où une grande partie de la masse du robot se concentre. Le robot est compensé en gravité par un mécanisme à ressort.

Les efforts que le robot **D2M2** exerce sur son environnement sont mesurés grâce à un capteur d'effort à six composantes ATI Mini 40 rigidement fixé entre le robot et son effecteur. L'environnement distant comporte plusieurs objets de raideurs différentes. Trois types d'objet sont choisis pour représenter successivement un environnement mou (une balle en mousse), de rigidité moyenne (de la mousse dense, une balle à moitié remplie d'air) et très rigide (un livre). La Figure 2.7(c) montre les objets utilisés pour réaliser nos différentes expérimentations.

Le robot **D2M2**, le capteur d'effort et l'environnement distant, forment le système esclave à commander. Pour piloter ce système, un ordinateur fonctionnant avec une couche temps réel RTX sous Windows XP communique, grâce à deux cartes d'entrée/sortie, avec les variateurs du robot **D2M2** et le capteur d'effort ATI. Les informations envoyées par l'ordinateur sont les couples moteurs à appliquer au niveau de chaque actionneur du robot esclave **D2M2**. Le robot et le capteur d'effort transmettent respectivement, à l'ordinateur, les positions articulaires courantes et les efforts mesurés. La période d'échantillonnage pour la commande du robot esclave **D2M2** est $h = 0.7$ [ms] (1.42 [KHz]).

2.4.2 Résultats expérimentaux

Les expérimentations menées pour valider l'architecture de télé-opération se caractérisent par deux phases d'évolution du robot. Pendant la première phase, l'opérateur télé-opère le robot dans un espace libre et le fait se déplacer suivant les trois directions de son espace de travail opérationnel. Lorsque le robot esclave arrive à proximité d'un objet distant, la deuxième phase de manipulation débute. L'opérateur télé-opère alors le robot pour exercer un effort sur un objet suivant la direction verticale z . Les objets considérés

Paramètre	K_2	$K_{s,n}$	T_{cl}	$Q_{k_{1,1}}$	$Q_{k_{2,2}}$	$Q_{k_{i,i}}$	Q_{p_k}	R_k	P_0
Unité	[Ns/m]	[N/m]	[s]	[N ²]	[N ² /s ²]	[N ²]	[N ²]	[N ²]	
x	5	300	0.075	10^{-9}	10^{-12}	10^{-12}	$10^{-4.2}$	100	Q_k
y	5	300	0.075	10^{-9}	10^{-12}	10^{-12}	$10^{-4.2}$	100	Q_k
z	10	200	0.075	10^{-9}	10^{-12}	10^{-12}	$10^{-4.2}$	100	Q_k

Tableau 2.1 - Paramètres de modélisation, d'estimation et de commande par retour d'état ($i = 3, \dots, 7$). L'unité de chaque élément de P_0 dépend de l'état qui lui correspond.

sont la petite balle en mousse et le ballon à moitié rempli d'air illustrés sur la Figure 2.7(c). Dans cette phase d'évaluation, il est important de préciser que la télé-opération est réalisée selon les trois directions x , y et z du repère R_0 mais que nous traitons uniquement les interactions et les efforts appliqués F_e selon la direction z .

Le nombre de degrés de liberté opérationnels du robot **D2M2** est $m = n = 5$. Cependant, nous réalisons la télé-opération uniquement selon les axes x , y et z de son repère R_0 . Nous reproduisons alors le schéma de télé-opération et de commande en effort de la Figure 2.5 indépendamment pour les trois directions et nous imposons une commande en effort nulle pour les deux orientations (en boucle ouverte). f^* est alors donnée par :

$$f^* = [f_x^* \ f_y^* \ f_z^* \ 0 \ 0]^T, \quad (2.74)$$

où f_x^* , f_y^* et f_z^* représentent respectivement les efforts de commande générés par le retour d'état en L_r et de vitesse en K_2 suivant les directions x , y et z .

Un essai en boucle ouverte a permis d'estimer le retard propre du robot à $T_d = 3.5$ [ms]. Sachant que la période d'échantillonnage est $h = 0.7$ [ms], le retard calculé en nombre de période d'échantillonnage est $d = 5$. L'état du système $[x_{r,k}^T \ p_k]^T$ ainsi que son estimé $[\hat{x}_{r,k}^T \ \hat{p}_k]^T$, sont alors de dimension (8×1) . La matrice de covariance Q_k ainsi que celle de l'erreur d'estimation P_k sont donc de dimension (8×8) .

Pour les trois directions opérationnelles, les paramètres de télé-opération sont choisis tels que

$$\beta_{p,j} = 2 \quad , \quad \beta_{f,j} = 0.1 \quad \text{et} \quad K_{v,j} = 1000 \quad [\text{N/m}] \quad \text{avec} \quad j = x, y, z. \quad (2.75)$$

Les paramètres concernant l'estimation de l'état (relations (2.67)-(2.73)), la commande par retour d'état (relations (2.43)-(2.46)) et le retour en vitesse K_2 sont donnés dans le Tableau 2.1. Ces paramètres ont été choisis de façon à assurer la stabilité du système avec un bon suivi de trajectoire lors d'une télé-opération en espace libre. Ils permettent aussi l'application d'un effort sur un objet mou et une transition stable d'une phase à une autre (selon la direction z). Les paramètres adoptés pour l'estimation de l'état étendu (cf. Tableau 2.1) ont été choisis en considérant que l'état actif p_k est l'état le plus incertain du modèle (grande valeur de Q_{p_k} comparée à celles de Q_k). Ce choix permet d'avoir une grande dynamique d'estimation de p_k et donc une grande réaction face aux erreurs de modélisation.

Pour évaluer les performances du schéma de télé-opération, nous présenterons tout d'abord une expérience où seul un déplacement dans un espace libre est effectué. Nous illustrerons ensuite les résultats d'une télé-opération qui met en évidence une prise de contact avec l'objet en mousse.

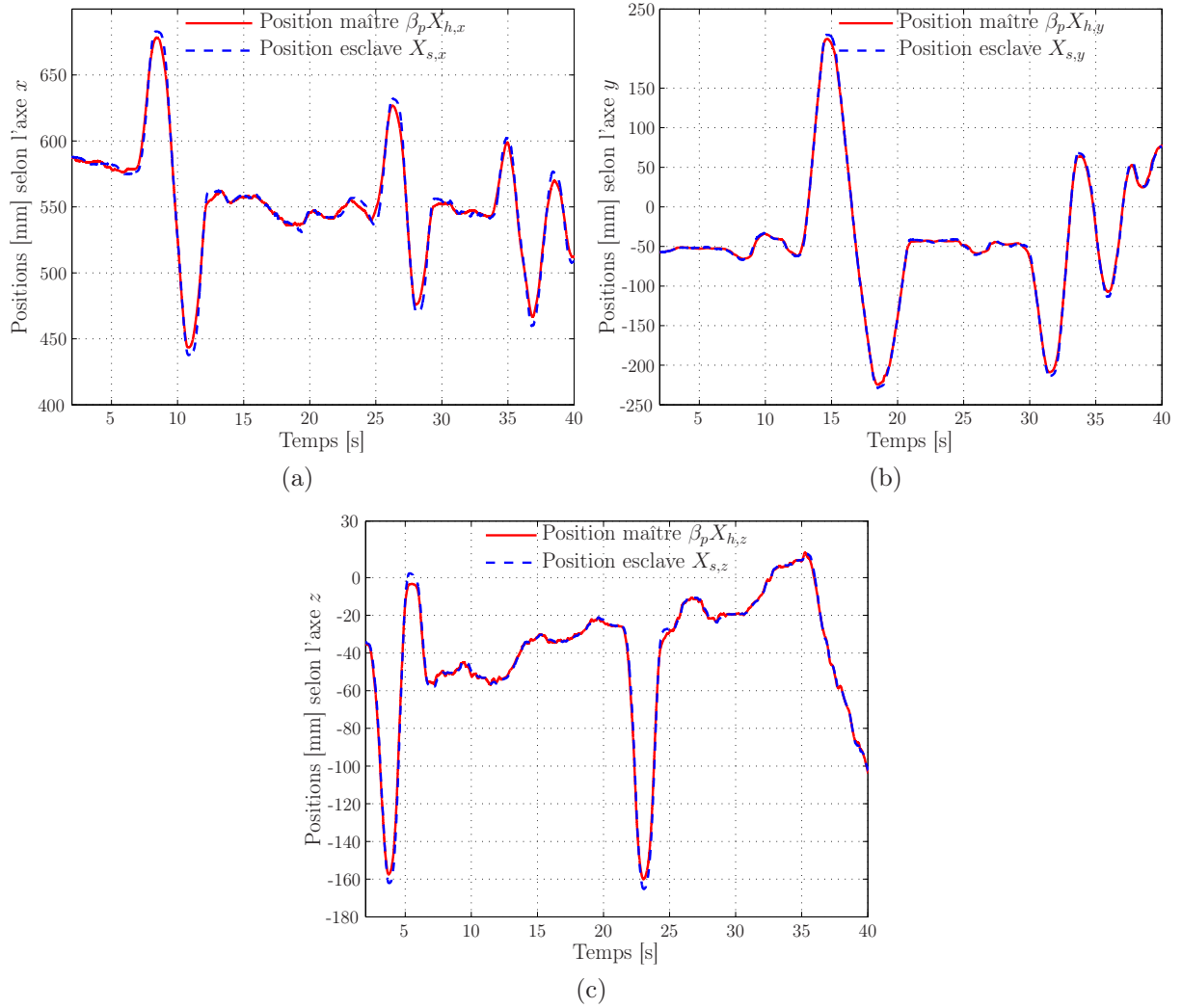


Figure 2.8 - *Suivi en position d'une trajectoire en espace libre imposée par l'opérateur :*
(a) *suivi de trajectoire suivant la direction x*, (b) *suivi de trajectoire suivant la direction y* et (c) *suivi de trajectoire suivant la direction z du repère R_0 .*

2.4.2.1 Déplacement en espace libre

Durant cette expérience, l'opérateur manipule le bras haptique **PHANTOM 1.5** et télé-opère le robot distant **D2M2** qui se déplace dans un espace libre. Les courbes de la Figure 2.8 montrent les résultats de suivi de trajectoire. Ces données présentent la position cartésienne du bras haptique et celle du robot esclave établies dans le repère de base R_0 du robot esclave. La mise en correspondance entre les deux positions a été faite à un instant $t_0 = 0$ [s] qui représente le début de l'expérience.

La Figure 2.9 montre les efforts mesurés, estimés et désirés obtenus lors de cette expérience. Puisque la télé-opération se réalise dans un espace libre, les efforts mesurés F_e sont très faibles selon toutes les directions et seul le bruit de mesure du capteur d'effort est enregistré. Les efforts désirés F_d sont, après multiplication par $-\beta_f$, ressentis par l'opérateur au niveau de l'interface haptique. Les efforts $\hat{y}$ sont ceux estimés par l'observateur actif et utilisés dans la commande par retour d'état. Les évolutions de la commande $u_k = L_1 F_d - [L_r \ 1] [\hat{x}_{r,k}^T \ \hat{p}_k]^T$ ainsi que l'évolution de l'état actif $-\hat{p}_k$ selon les trois directions, sont illustrées sur la Figure 2.10.

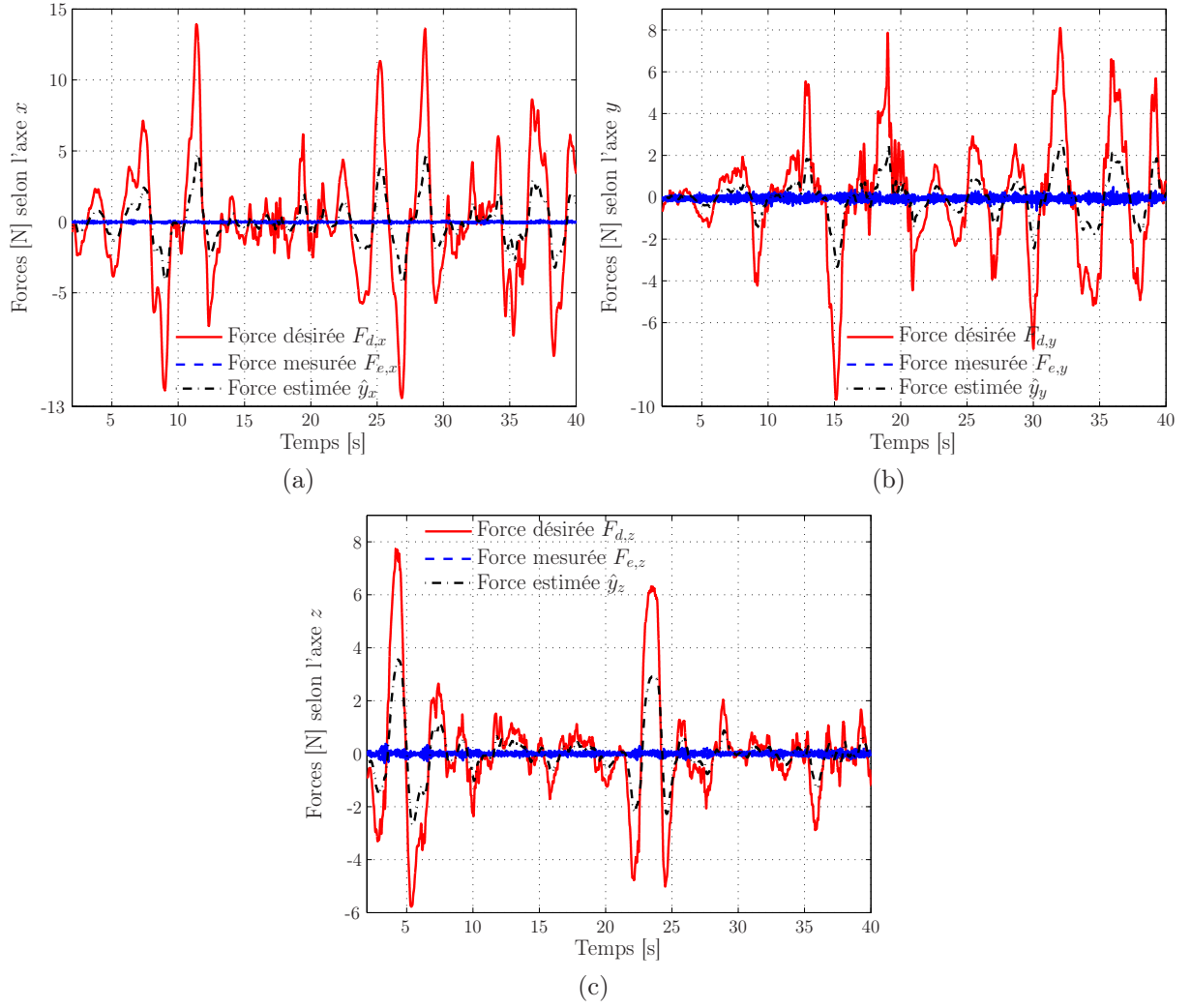


Figure 2.9 - Efforts mesurés F_e , estimés $\hat{y}$ et désirés F_d lors d'une télé-opération en espace libre : (a) efforts suivant la direction x , (b) efforts suivant la direction y et (c) efforts suivant la direction z du repère R_0 . $-\beta_f F_d$ représente l'effort ressenti par l'opérateur au niveau du bras haptique **PHANToM** 1.5.

Remarques

Dans les développements théoriques exposés précédemment, nous avons considéré que le système esclave à commander était formé d'un robot portant un capteur d'effort et en contact avec un environnement. Lors d'une télé-opération dans un espace libre, le modèle établi (2.20)-(2.26) ne représente plus exactement le système réel à commander. Ceci explique la mauvaise estimation des efforts mesurés F_e illustrée sur la Figure 2.9.

Cependant, malgré cette erreur structurelle de modélisation, le système reste stable. Sur la Figure 2.10, il est possible de constater que la quasi-totalité de la commande $u_k = L_1 F_d - [L_r \ 1] [\hat{x}_{r,k}^T \ \hat{p}_k]^T$ est fournie par l'état actif $-\hat{p}_k$.

La télé-opération dans un espace libre a été réalisée grâce au schéma position - position. Bien que le système esclave soit commandé en effort et non en position, il se déplace jusqu'à annuler l'effort désiré F_d et donc annuler l'erreur entre sa position X_s et la position de la station maître $\beta_p X_h$. Dans un espace libre, les performances de suivi de trajectoire représentent la transparence du schéma de télé-opération et sa capacité à informer l'opérateur sur les mouvements libres du robot esclave (voir §1.2.3.2).

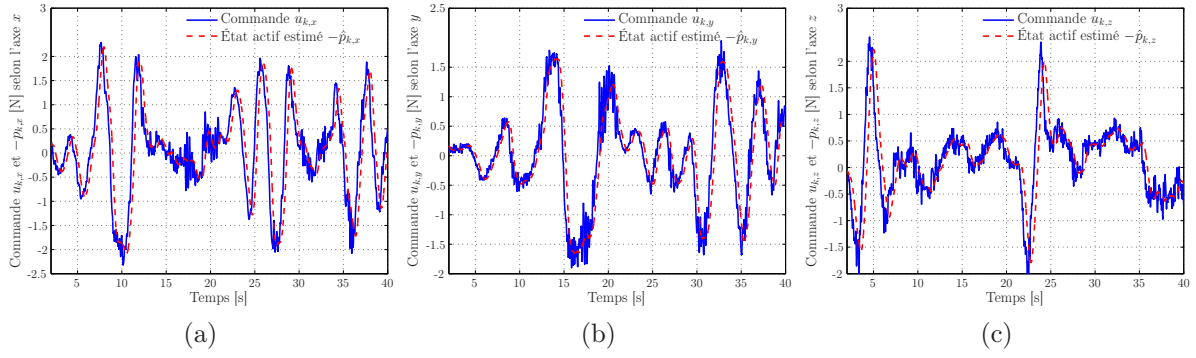


Figure 2.10 - L'état actif estimé $-\hat{p}_k$ et la commande par retour d'état $u_k = L_1 F_d - [\mathbf{L}_r \ 1] [\hat{\mathbf{x}}_{r,k}^T \ \hat{p}_k]^T$ lors d'une télé-opération en espace libre : (a) suivant la direction x , (b) suivant la direction y et (c) suivant la direction z du repère R_0 .

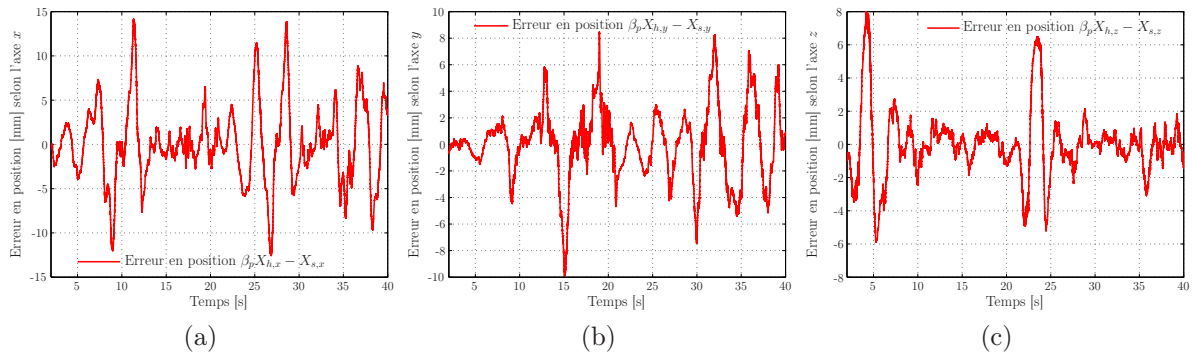


Figure 2.11 - Erreurs de poursuite $\beta_p X_h - X_s$ lors d'une télé-opération en espace libre : (a) suivant la direction x , (b) suivant la direction y et (c) suivant la direction z du repère R_0 .

La Figure 2.8 présente les résultats de suivi de trajectoire obtenu lors de la télé-opération en espace libre. Ces derniers montrent la capacité du robot esclave à reproduire les gestes de l'opérateur. Ils ont été obtenus grâce à la faible valeur choisie pour la raideur nominale $K_{s,n}$ (selon les trois directions). Les erreurs de poursuite suivant les trois directions sont visibles sur la Figure 2.11.

La Figure 2.9 montre les efforts désirés appliqués au système esclave. Après multiplication par $\beta_f = 0.1$, ces efforts sont ressentis par l'opérateur au niveau de l'interface haptique. Ils varient entre -1.2 et 1.2 [N] selon x , -1 et 0.8 [N] selon y et enfin entre -0.6 et 0.8 [N] suivant l'axe z . Ils fournissent donc de bonnes sensations à l'opérateur et lui permettent d'avoir des informations utiles concernant le robot esclave en mouvement.

Grâce au schéma de télé-opération position - position, à la commande interne en vitesse (en K_2) et à la commande en effort imposant une faible rigidité du système esclave, l'opérateur est capable de percevoir les interactions entre le robot et une tierce personne. Cette propriété est d'un grand intérêt dans une salle d'opération où l'équipe médicale est amenée à agir sur le robot chirurgical (changement d'instrument par exemple).

2.4.2.2 Interaction avec un objet mou

Cette expérience illustre une télé-opération lors d'une prise de contact avec un objet mou (la balle en mousse illustrée sur la Figure 2.7(c)). Le contact se réalise suivant l'axe z du repère R_0 du robot esclave. Pour faciliter l'analyse, les efforts latéraux suivant (x, y) ont été considérés nuls. Nous ne présenterons donc que les informations en effort relatives à l'axe z .

La Figure 2.12 illustre les résultats de suivi de trajectoires imposées par l'opérateur ($\beta_p X_h$) et reproduites par le robot esclave (X_s). Dans un premier temps, l'opérateur déplace le robot esclave en espace libre jusqu'à atteindre la position de l'objet considéré. Une fois atteinte (à $t_0 = 14.3$ [s]), l'opérateur applique un effort allant jusqu'à -20 [N]. 8 [s] plus tard, l'opérateur soulève le robot esclave et réalise un nouveau déplacement dans un espace libre.

La Figure 2.13 présente les efforts appliqués F_e , estimés par l'observateur actif $\hat{y}$ et désirés par l'opérateur F_d suivant la direction z . Tout au long de l'expérience, les efforts désirés F_d sont multipliés par $-\beta_f$ et ressentis par l'opérateur au niveau de l'interface haptique. Au moment du contact, ce dernier ressent un effort allant jusqu'à 2 [N] suivant l'axe z . La commande $u_k = F_d - [L_r \ 1] [\hat{x}_{r,k}^T \ \hat{p}_k]^T$ et l'état actif estimé $-\hat{p}_k$ selon la direction z , sont donnés sur la Figure 2.14.

Remarques

Les résultats donnés par les Figures. 2.12, 2.13 et 2.14 montrent un comportement stable du système pendant toutes les phases de télé-opération à savoir le déplacement en espace libre, l'application d'un effort sur un objet mou et la transition d'une phase à une autre.

Suivant l'axe z , une erreur importante en position (voir Figure 2.12(c)) apparaît au moment de la prise de contact avec l'objet mou. Elle génère un effort désiré F_d , ressenti par l'opérateur ($-\beta_f F_d$) et appliqué en entrée du système esclave. La loi de commande en effort permet au robot esclave d'appliquer ces efforts sur l'objet considéré ($F_e = F_d$).

Sur la Figure 2.14, une réaction de l'état actif $\hat{p}_k$ par rapport à la commande u_k apparaît aux deux instants de transition (de "sans" à "avec" contact et vice-versa). Pendant l'application de l'effort, $\hat{p}_k$ devient faible montrant la disparition des erreurs structurelles de modélisation (voir **Remarques** du §2.4.2.1). Ceci a permis une parfaite estimation des efforts mesurés F_e comme illustré sur la Figure 2.13. Les erreurs restantes et estimées par $\hat{p}_k$ peuvent provenir d'une estimation erronée des paramètres de J , $\hat{M}_x$, $\hat{V}_x$, $\hat{G}_x$ et de $K_{s,n}$.

Sur la Figure 2.13 lors de l'interaction avec l'objet, les efforts désirés F_d et ressentis $-\beta_f F_d$ par l'opérateur sont égaux à l'effort mesuré F_e . L'opérateur est alors capable de ressentir et de contrôler cet effort au niveau et à partir de son interface haptique. Concernant l'impédance transmise et ressentie par l'opérateur (la transparence, voir §1.2.3.2), il est possible de voir à partir des données expérimentales de la Figure 2.12(c) que lorsque l'opérateur applique un effort, la position de sa main varie par rapport à la position de contact (estimée à $\simeq -110$ [mm]). Une autre variation apparaît lorsque l'effort est plus grand (à $t \approx 18$ [s]). Ce comportement représente effectivement l'application d'un effort sur un objet mou. Cependant, la seule information relative à l'environnement et transmise au site maître est la raideur nominale $K_{s,n} = 200$ [N/m]. Cette raideur, choisie faible pour assurer la stabilité et le suivi de trajectoire en espace libre, ne représente qu'une estimation *a priori* de la raideur réelle K_s de l'environnement. Les sensations perçues par l'opérateur

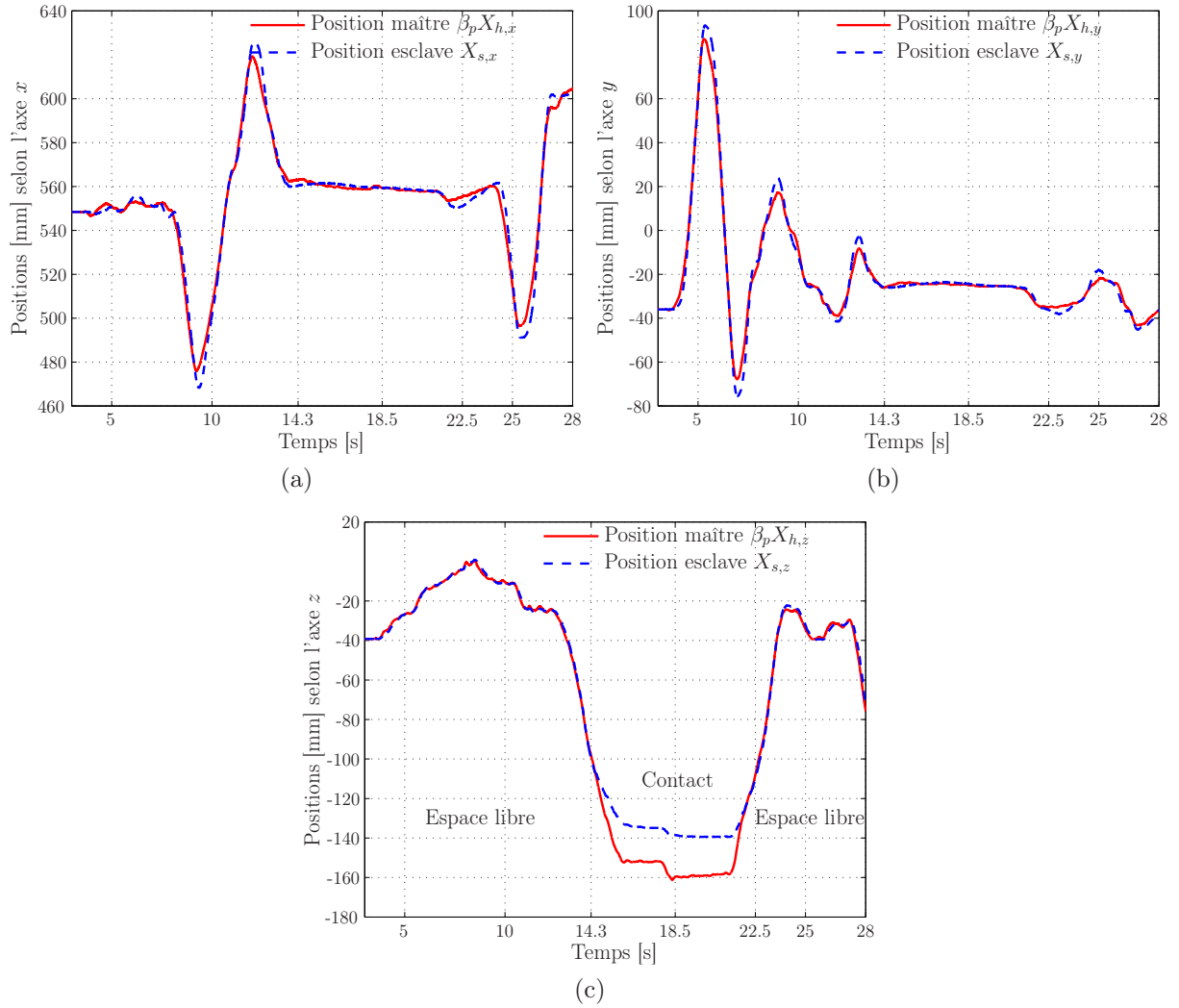


Figure 2.12 - *Suivi en position d'une trajectoire imposée par l'opérateur lors d'une télé-opération et prise de contact avec un objet mou suivant la direction z du repère R_0 : (a) suivi de trajectoire suivant la direction x , (b) suivi de trajectoire suivant la direction y et (c) suivi de trajectoire suivant la direction z du repère R_0 .*

sont alors limitées par la raideur nominale choisie dans la stratégie de commande en effort. Une étude plus approfondie de la transparence du schéma de télé-opération sera présentée dans le Chapitre 3.

2.4.2.3 Interaction avec un objet de rigidité moyenne

Cette dernière expérience montre une télé-opération avec prise de contact avec un objet de rigidité moyenne (le ballon en cuir à moitié rempli d'air visible sur la Figure 2.7(c)). Comme pour l'expérience précédente, les interactions sont uniquement réalisées suivant l'axe z du repère R_0 du robot esclave. Les résultats obtenus sont donnés sur la Figure 2.15. Ils montrent un comportement instable du système esclave.

Les données en effort (Figure 2.15(a)) montrent qu'il est impossible pour l'opérateur d'interagir et d'appliquer des efforts sur l'objet. La commande par retour d'état u_k , visible sur la Figure 2.15(c), ne parvient pas à contrôler et à appliquer les efforts désirés par

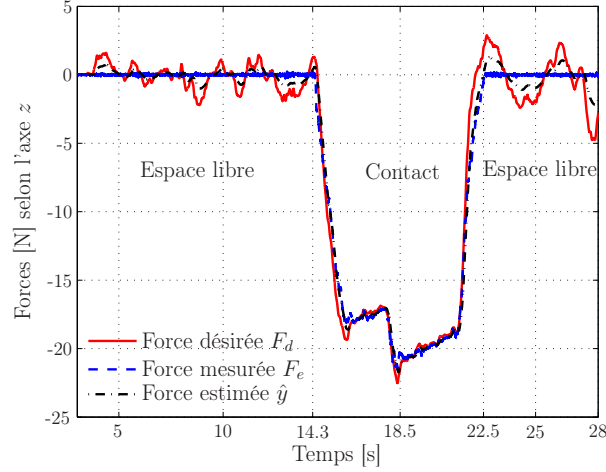


Figure 2.13 - Efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}$ et désiré F_d lors d'une télé-opération et prise de contact avec un objet mou suivant la direction z du repère R_0 . $-\beta_f F_d$ représente l'effort ressenti par l'opérateur au niveau du bras haptique **PHANTOM** 1.5.

l'opérateur. Ceci est essentiellement dû à l'observateur actif et à la commande par retour d'état qui, étant élaborés pour des interactions avec un environnement mou ($K_{s,n} = 200$ [N/m]), ne réussissent pas à estimer et à contrôler les efforts appliqués F_e .

En effet, cette raideur nominale $K_{s,n}$, choisie faible, limite l'environnement avec lequel le robot esclave peut interagir. Une étude théorique, menée dans [Cortês et al., 2006a], montre que lors d'une sous-estimation de la raideur de l'environnement ($K_{s,n} < K_s$), le système esclave est stable si l'erreur d'estimation δK_s , donnée par

$$\delta K_s = K_s - K_{s,n}, \quad (2.76)$$

est

$$\delta K_s < f(K_{s,n}), \quad (2.77)$$

où $f(K_{s,n})$ est un scalaire positif qui dépend de la raideur nominale $K_{s,n}$. Pour une raideur nominale $K_{s,n} = 200$ [N/m], le système est stable si $f(K_{s,n}) = 1400$ [N/m] ($K_s \leq 1600$ [N/m]) [Cortês et al., 2006a].

Une estimation en ligne de l'environnement distant devient alors essentielle, non seulement pour la transparence du schéma de télé-opération (voir **Remarques** du §2.4.2.2), mais surtout pour assurer la stabilité du système lors des interactions avec un environnement rigide.

2.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la synthèse d'une architecture de télé-opération avec retour d'effort dédiée à l'assistance du geste chirurgical. L'architecture choisie est de type position-position avec une commande en effort du système esclave. Dans ce schéma de télé-opération, l'erreur en position entre les deux sites est traduite en un effort ressenti par l'opérateur et imposé au système esclave contrôlé en effort. Cette commande se base sur le modèle du robot esclave en contact avec son environnement. Elle utilise alors les techniques de découplage non-linéaire afin de réduire le problème de commande à celui de plusieurs systèmes linéaires et parfaitement découplés. Des stratégies d'estimation et de

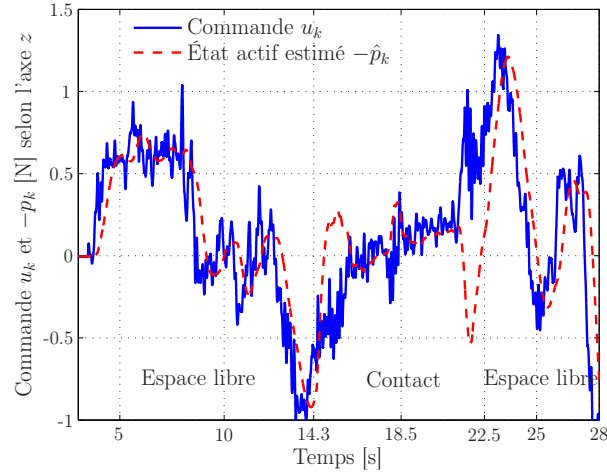


Figure 2.14 - L'état actif estimé $-\hat{p}_k$ et la commande par retour d'état $u_k = L_1 F_d - [\mathbf{L}_r \ 1] [\hat{\mathbf{x}}_{r,k}^T \ \hat{p}_k]^T$ lors d'une télé-opération et prise de contact avec un objet mou suivant la direction z de R_0 .

commande par retour d'état ont alors été utilisées afin de contrôler les efforts appliqués par le robot esclave sur son environnement. L'observateur d'état qui a été choisi est un observateur actif qui réalise l'estimation des erreurs de modélisation du système esclave. L'intégration de cette estimation dans la commande par retour d'état permet alors de minimiser l'effet de ces erreurs et de garantir les performances désirées de la stratégie de commande.

L'évaluation expérimentale de l'architecture de télé-opération a été réalisée sur une plate-forme robotique constituée d'un robot manipulateur et d'une interface haptique. L'architecture en position - position a permis au système esclave de reproduire les gestes de l'opérateur et de lui transmettre des informations concernant ses déplacements en espace libre. Grâce à la commande en effort du système esclave, l'opérateur a pu interagir avec un environnement distant de faible rigidité. À travers l'interface haptique, il a ainsi contrôlé et ressenti les efforts appliqués par le robot esclave. Cette architecture de télé-opération tire profit des performances d'un schéma en position - position tout en intégrant une commande en effort du système esclave.

Cependant, cette architecture de télé-opération présente deux limitations majeures liées à la connaissance des caractéristiques de l'environnement. Elles concernent la stabilité de la commande en effort lors des interactions avec un environnement de rigidité élevée et la transparence du schéma de télé-opération. Afin de garantir la stabilité du système, une estimation en ligne de la raideur de l'environnement sera présentée dans le chapitre suivant. Une adaptation des paramètres de commande permettra, après analyse de la transparence et de la stabilité du schéma de télé-opération, d'imposer une transparence désirée tout en garantissant des marges de stabilité satisfaisantes.

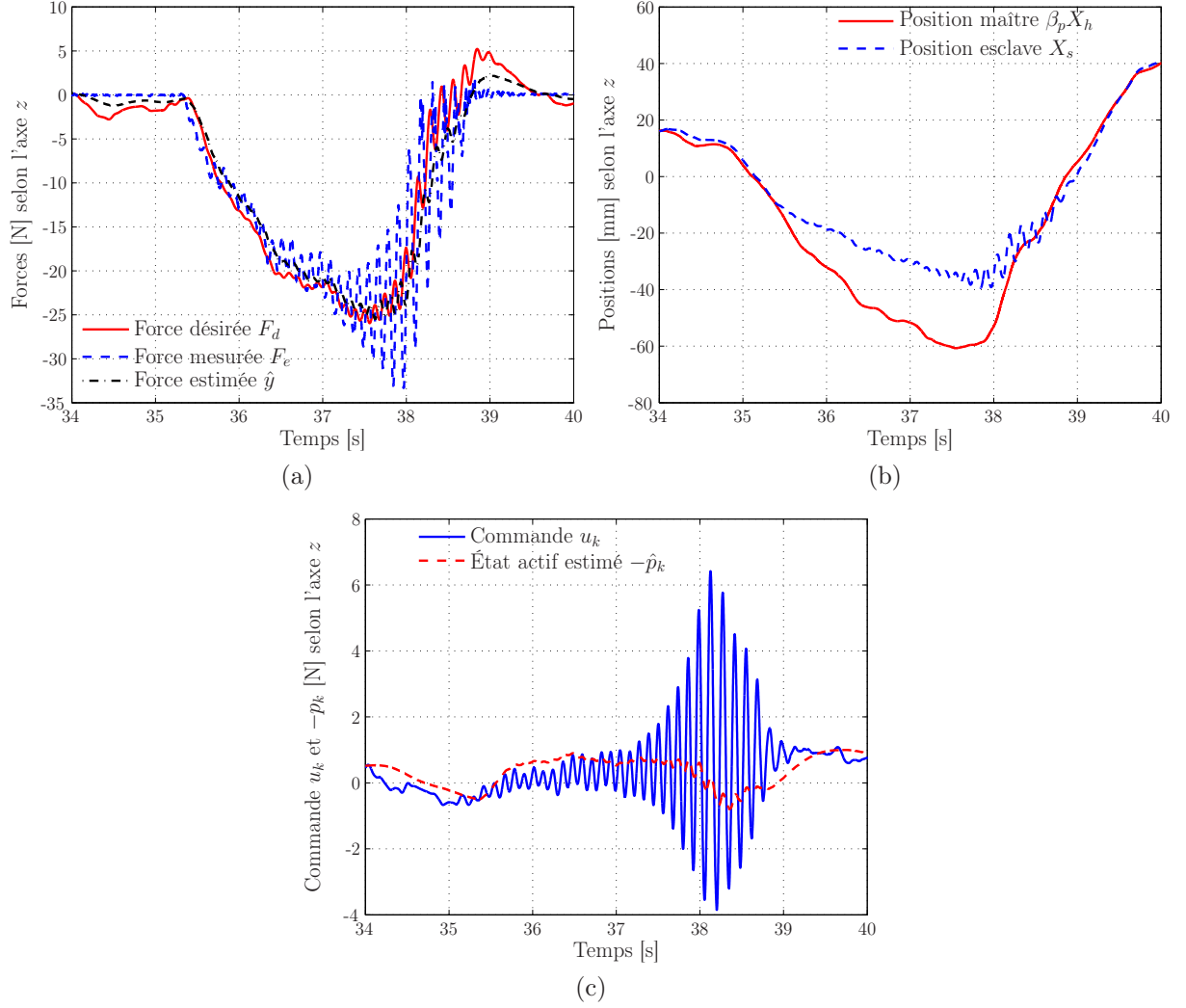


Figure 2.15 - Les efforts, les positions et la commande lors d'une télé-opération et prise de contact avec un objet de rigidité moyenne (balle moitié remplie d'air de la Figure 2.7(c)) suivant la direction z d'un repère R_0 : (a) efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}$ et désiré F_d ($-\beta_f F_d$ représente l'effort ressenti par l'opérateur au niveau du bras haptique **PHANToM** 1.5), (b) suivi d'une trajectoire imposée par l'opérateur et (c) état actif estimé $-\hat{p}_k$ et la commande $u_k = L_1 F_d - [\mathbf{L}_r \ 1] [\hat{\mathbf{x}}_{r,k}^T \ \hat{p}_k]^T$.

Chapitre 3

Transparence et stabilité du schéma de télé-opération

Sommaire

3.1	Introduction	55
3.2	Estimation de la raideur de l'environnement et commande adaptative	56
3.2.1	Stratégies d'estimation paramétrique	56
3.2.2	Filtre de Kalman étendu pour l'estimation de la raideur	58
3.2.3	Compensation des erreurs de modélisation	63
3.2.4	Télé-opération et estimation en ligne de la raideur de l'environnement	67
3.2.5	Conclusion	67
3.3	Transparence et stabilité du schéma de télé-opération	69
3.3.1	Transparence du schéma de télé-opération	69
3.3.2	Stabilité du schéma de télé-opération	73
3.3.3	Compromis stabilité/transparence et commande adaptative	76
3.4	Télé-opération et interaction avec des tissus <i>ex-vivo</i>	80
3.4.1	Interaction avec des tissus <i>ex-vivo</i>	80
3.4.2	Insertion d'aiguille télé-opérée	84
3.5	Conclusion	88

3.1 Introduction

En chirurgie mini-invasive robotisée, les interactions peuvent être de nature extrêmement diverses. Elles sont non seulement effectuées avec des tissus mous de type organes, muscles, veines, etc ..., mais aussi avec des tissus rigides comme le sternum, les côtes de la cage thoracique, etc ...ou encore avec d'autres instruments. La diversité et l'incertitude associées à la connaissance de l'environnement deviennent un élément central pour garantir la stabilité et la transparence du schéma de télé-opération avec retour d'effort. La synthèse d'une telle architecture doit donc tenir compte de ces interactions avec des tissus et des objets de rigidité différente.

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté un schéma de télé-opération avec retour d'effort de type position - position dont la commande en effort du robot esclave repose sur la connaissance d'une raideur nominale de l'environnement. Ce schéma de télé-opération a été validé sur une plate-forme expérimentale en réalisant trois types d'expérience : télé-opération en espace libre, interaction avec un objet mou et un objet de rigidité moyenne. Les résultats obtenus à la suite de ces expérimentations mettent en évidence un certain nombre de limitations. En effet, d'abord la transparence du schéma

de télé-opération dépend de la raideur nominale utilisée dans la stratégie de commande en effort. De plus, dès que l'interaction intervient avec un objet plus rigide, la stabilité de la commande en effort se dégrade considérablement. Qu'elles concernent la stabilité du système esclave ou la transparence du schéma de télé-opération, ces limitations sont fortement liées à la connaissance des caractéristiques de l'environnement distant.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons donc à la caractérisation en ligne de la raideur K_s de l'environnement et son influence sur la stabilité et la transparence du système. Nous proposerons d'abord une estimation en ligne de la raideur K_s . La stratégie adoptée repose sur le modèle, établi dans le chapitre précédent, du système esclave incluant le robot et l'environnement. Les premières expérimentations intégrant cette stratégie d'estimation de la raideur montreront l'influence des erreurs de modélisation du robot esclave sur le paramètre estimé. Nous proposerons donc une compensation de ces erreurs dans la stratégie d'estimation en ligne. L'adaptation de la loi de commande en effort en fonction de la raideur estimée permettra finalement, à travers des résultats expérimentaux, de garantir la stabilité du système lors des interactions avec un environnement de rigidité plus élevée. Dans un deuxième temps, nous analyserons la transparence et la stabilité du schéma de télé-opération en distinguant le mouvement volontaire et involontaire de l'opérateur. En se basant sur un compromis entre stabilité et transparence, nous proposerons une adaptation des paramètres de télé-opération afin d'imposer une transparence désirée et des marges de stabilité satisfaisantes. Le chapitre se conclura par une présentation des résultats *ex-vivo* montrant la stabilité et la transparence du schéma de télé-opération avec retour d'effort. Nous nous intéresserons non seulement à une interaction simple avec des tissus, mais aussi au geste d'insertion d'aiguille télé-opérée [Stoianovici *et al.*, 2003]. Dans ce cas, le retour d'effort permet au chirurgien de distinguer et de maîtriser les différentes étapes de l'insertion [Gerovichev *et al.*, 2002], [Barbé *et al.*, 2007a].

3.2 Estimation de la raideur de l'environnement et commande adaptative

Après un bref état de l'art des techniques d'estimation paramétrique, nous proposons une stratégie d'estimation en ligne de la raideur K_s de l'environnement. L'avantage de la stratégie adoptée réside dans le fait qu'elle utilise le modèle du système esclave dans lequel la position de repos de l'environnement n'est pas considérée et les erreurs de modélisation du robot esclave (dues à un découplage non linéaire imparfait par exemple) peuvent être identifiées. Cette stratégie sera ensuite développée et validée sur notre plate-forme expérimentale.

3.2.1 Stratégies d'estimation paramétrique

Les interactions entre un instrument et un organe peuvent être caractérisées par des modèles non linéaires [Maurin *et al.*, 2004a] de type exponentiel [Maurel, 1999], polynomial [Okamura *et al.*, 2004], ou encore suivant le modèle de Hunt-Crossley dans lequel les efforts d'interaction dépendent de la pénétration de l'instrument dans les organes [Diolaiti *et al.*, 2005a]. Cependant, le modèle le plus utilisé pour représenter ces interactions est certainement le modèle de Kelvin-Voigt qui s'écrit sous une forme linéaire reliant les position/vitesse de l'effecteur du robot dans l'espace opérationnel à la force qu'il applique [Gersem, 2005], [Barbé *et al.*, 2007b]. Suivant une direction de déplacement, ce modèle

s'écrit

$$F_e = \begin{cases} K_s(X_s - X_{s_0}) + B_s\dot{X}_s & \text{si } X_s \geq X_{s_0} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}, \quad (3.1)$$

où X_{s_0} est la position de repos de l'environnement. K_s et B_s représentent respectivement sa raideur et son facteur d'amortissement. Ces paramètres peuvent être considérés variables, comme c'est le cas dans [Ortmaier, 2002] et [Barbé *et al.*, 2006] ou constants [Okamura *et al.*, 2004].

Misra et Okamura [Misra et Okamura, 2006] ont développé un système de télé-opération de type force - force avec une estimation par la méthode du gradient des paramètres de l'environnement en se basant sur le modèle linéaire (3.1). La stabilité de cette stratégie a été prouvée en considérant une fonction de Lyapunov. Wang *et al* [Wang *et al.*, 2005] proposent également un schéma de télé-opération intégrant une stratégie d'estimation des paramètres du modèle (3.1) mais en considérant un algorithme d'estimation par moindres carrés récursifs (RLS¹). Les deux approches précédentes ont été comparées dans [Erickson *et al.*, 2003]. Au delà des performances des deux stratégies et de la difficulté que présente chacune d'elle dans le choix des gains d'estimation, les auteurs mettent en évidence le problème de l'excitation permanente du système pour obtenir une bonne estimation. En conséquence, l'estimation de la raideur de l'environnement K_s n'est pas garantie lors d'une télé-opération en espace libre par exemple (dans ce cas la raideur estimée doit converger vers 0 [N/m]). Un autre problème, propre à l'algorithme des moindres carrés récursifs, a été soulevé dans [Ljung et Söderström, 1983]. Il concerne la convergence de l'algorithme en présence de bruits sur les variables mesurées F_e . Ces bruits doivent être indépendants des variables X_s et $\dot{X}_s$, ce qui est difficile à garantir en conditions expérimentales.

Cependant, l'utilisation du modèle linéaire (3.1) implique la connaissance de la position de repos X_{s_0} de l'environnement. La plupart du temps considérée nulle [Diolaiti *et al.*, 2005a], [Barbé *et al.*, 2007a], cette position est souvent difficile à obtenir. Certains travaux proposent une procédure qui consiste à discrétiser l'espace de travail du robot et à enregistrer la position de repos X_{s_0} [Wang *et al.*, 2005], [Weber *et al.*, 2006]. Cette technique, initialement proposée dans [Love et Book, 2004], nécessite une phase d'apprentissage qu'il n'est pas toujours possible de réaliser mais surtout suppose que les positions de repos sont fixes. En chirurgie mini-invasive, cette technique est impossible à mettre en œuvre puisque la position X_{s_0} dépend de la position de l'organe qui peut varier suivant son mouvement (à cause des mouvements respiratoires et cardiaques par exemple). Ce problème lié à la position de repos ainsi que celui des bruits sur la mesure, ont été évoqués dans [Gersem, 2005]. L'auteur considère alors que la position variable X_{s_0} génère un effort de contact $F_{e_0} = K_s X_{s_0}$. Un filtre de Kalman étendu a alors été appliqué au modèle (3.1) pour réaliser l'estimation simultanée des deux paramètres K_s et F_{e_0} . Néanmoins, des problèmes liés au fait que le paramètre F_{e_0} est fortement dépendant de K_s , ont imposé une estimation toutes les deux périodes d'échantillonnage [Gersem, 2005].

Pour réaliser l'estimation de la raideur K_s de l'environnement, nous considérons que les interactions entre l'instrument et les organes sont données par le modèle de Kelvin-Voigt (3.1) dans lequel le paramètre d'amortissement n'est pas considéré puisque la vitesse de déplacement du robot est supposée très faible. Cependant comme cela a été expliqué, ce modèle présente la problématique des bruits sur la mesure de l'effort F_e et de la position X_s , mais surtout de la position de repos X_{s_0} de l'environnement. La solution que nous devons adopter doit s'affranchir de ces deux contraintes. Nous choisissons un filtre de Kalman étendu pour l'estimation de la raideur K_s de l'environnement. Cet estimateur

¹Pour *Recursive Least Square*.

est une solution qui permet de distinguer les bruits de mesure sur la variable d'effort F_e et de position X_s du modèle (3.1). Afin de s'affranchir de la position de repos X_{s_0} (et de F_{e_0} [Gersem, 2005]), nous proposons d'appliquer cet estimateur en se basant sur le modèle du système esclave donné par la représentation d'état (2.20)-(2.33) dans laquelle la position de repos n'est pas considérée et les interactions avec l'environnement sont elles aussi définies par le modèle de Kelvin-Voigt (3.1). La synthèse de cet estimateur ainsi que de l'adaptation de la commande en effort sont présentés dans les paragraphes suivants.

3.2.2 Filtre de Kalman étendu pour l'estimation de la raideur

3.2.2.1 Estimation d'un paramètre inconnu par un filtre de Kalman étendu

Dans la suite, pour distinguer les variables d'état utilisées pour la commande en effort ($\mathbf{x}_{r,k}$, Φ_r , etc ...) de celles utilisées par le filtre de Kalman étendu pour l'estimation de la raideur de l'environnement, ces dernières seront écrites en ajoutant un exposant e pour "estimation de la raideur" soient $\mathbf{x}_{r,k}^e$, Φ_r^e , etc ...

Considérons le système composé du robot esclave **D2M2** en contact avec un environnement de raideur constante K_s . La représentation d'état de ce système est donnée sous une forme discrète par les relations (2.20)-(2.33). Dans cette représentation, seule la matrice d'état Φ_r dépend de la raideur K_s qui est exprimée en fonction de la raideur nominale $K_{s,n}$ par les relations (2.24) et (2.32). L'utilisation d'un filtre de Kalman étendu consiste à étendre le vecteur d'état $\mathbf{x}_{r,k}^e$ avec le paramètre $K_{s,k}^e$ qui représente la raideur K_s à un instant k . Le vecteur d'état étendu est alors noté $\mathbf{x}_k^e = [\mathbf{x}_{r,k}^{eT} K_{s,k}^e]^T$ et la nouvelle représentation d'état est

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{r,k}^e \\ K_{s,k}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_r^e(K_{s,k}^e) \mathbf{x}_{r,k-1}^e + \Gamma_r u_{k-1} \\ K_{s,k-1}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_k^e \\ 0 \end{bmatrix}, \\ y_k = \mathbf{C}_a \mathbf{x}_{k-1}^e + \eta_k^e \end{cases} \quad (3.2)$$

où u_{k-1} est l'entrée de commande par retour d'état donnée par la relation (2.66). Les entrées $\boldsymbol{\xi}_k^e$ et η_k^e sont des bruits blancs Gaussiens indépendants, de moyennes nulles, de dimensions respectives $((2+d) \times 1)$ et (1×1) et dont les matrices de covariance correspondantes sont définies positives et données par :

$$E[\boldsymbol{\xi}_{r,k}^e \boldsymbol{\xi}_{r,j}^{eT}] = \mathbf{Q}_{\mathbf{x}_{r,k}^e} \delta_{kj} \quad \text{et} \quad E[\eta_{y_k}^e \eta_{y_j}^{eT}] = R_k^e \delta_{kj} \quad (3.3)$$

avec $\mathbf{Q}_{\mathbf{x}_{r,k}^e}$ une matrice diagonale représentant des bruits indépendants sur l'état $\mathbf{x}_{r,k}^e$. Nous supposons ici que chaque élément de l'environnement possède une raideur K_s constante. Ainsi, nous ne considérons pas de bruit relatif à la raideur de l'environnement $K_{s,k}^e$ dans le modèle (3.2).

L'état étendu estimé à l'instant k s'écrit alors en fonction des informations données à l'instant $k-1$ et de la nouvelle observation de la sortie y_k . L'estimation se réalise en deux étapes [Ljung et Söderström, 1983] : la prédiction de l'état étendu $[\hat{\mathbf{x}}_{r,k|k-1}^e \hat{K}_{s,k|k-1}^e]^T$ donnée par

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{r,k|k-1}^e \\ \hat{K}_{s,k|k-1}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_r^e(\hat{K}_{s,k-1}^e) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{r,k-1}^e \\ \hat{K}_{s,k-1}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_r \\ 0 \end{bmatrix} u_{k-1} \quad (3.4)$$

et son estimation $[\hat{\mathbf{x}}_{r,k}^e \hat{K}_{s,k}^e]^T$ (la mise à jour de la prédiction) donnée par

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{r,k}^e \\ \hat{K}_{s,k}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{r,k|k-1}^e \\ \hat{K}_{s,k|k-1}^e \end{bmatrix} + \mathbf{N}_k^e (y_k - \mathbf{C}_r \hat{\mathbf{x}}_{r,k|k-1}^e). \quad (3.5)$$

L'effort estimé $\hat{y}_k^e$ est alors donné par

$$\hat{y}_k^e = \mathbf{C}_r \hat{\mathbf{x}}_{r,k}^e. \quad (3.6)$$

Le gain d'estimation $\mathbf{N}_k^e$ du filtre de Kalman étendu est de dimension $((2+d+1) \times 1)$. Il est donné par

$$\mathbf{N}_k^e = \mathbf{P}_{1k}^e \mathbf{C}_a^T [\mathbf{C}_a \mathbf{P}_{1k}^e \mathbf{C}_a^T + \mathbf{R}_k^e]^{-1}, \quad (3.7)$$

avec

$$\mathbf{P}_{1k}^e = \Phi_{k-1}^e \mathbf{P}_{k-1}^e \Phi_{k-1}^{eT} + \mathbf{Q}_k^e \quad (3.8)$$

et

$$\mathbf{P}_k^e = \mathbf{P}_{1k}^e - \mathbf{N}_k^e \mathbf{C}_a^e \mathbf{P}_{1k}^e. \quad (3.9)$$

$\Phi_{k-1}^e = \Phi_{k-1}^e(\hat{\mathbf{x}}_{r,k-1}^e, \hat{K}_{s,k-1}^e)$ est la matrice d'état du modèle étendu donnée par

$$\Phi_{k-1}^e(\hat{\mathbf{x}}_{r,k-1}^e, \hat{K}_{s,k-1}^e) = \begin{bmatrix} \Phi_r^e(\hat{K}_{s,k-1}^e) & \mathbf{M}(\hat{\mathbf{x}}_{r,k-1}^e, \hat{K}_{s,k-1}^e) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

avec

$$\mathbf{M}(\hat{\mathbf{x}}_{r,k-1}^e, \hat{K}_{s,k-1}^e) = \frac{\partial}{\partial K_s} \Phi_r^e(K_s)|_{K_s=\hat{K}_{s,k-1}^e} \hat{\mathbf{x}}_{r,k-1}^e \quad (3.11)$$

où

$$\frac{\partial}{\partial K_s} \Phi_r^e(K_s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \gamma_1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

γ_1 et γ_2 sont donnés par (cf. (2.34))

$$\gamma_1 = \frac{K_2 h - 1 + e^{-K_2 h}}{K_2^2} \text{ et } \gamma_2 = \frac{1 - e^{-K_2 h}}{K_2}. \quad (3.13)$$

La matrice $\mathbf{Q}_k^e$ représente la matrice de covariance associée à l'état étendu $\mathbf{x}_k^e = [\mathbf{x}_{r,k}^{eT} K_{s,k}^e]^T$. Elle est donnée par

$$\mathbf{Q}_k^e = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\mathbf{x}_{r,k}^e} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

$\mathbf{P}_k^e$ représente la matrice de covariance de l'erreur d'estimation après correction par le gain $\mathbf{N}_k^e$ dans (3.5). Elle est donnée par

$$\mathbf{P}_k^e = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\mathbf{x}_{r,k}^e} & 0 \\ 0 & P_{K_{s,k}^e} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

où $\mathbf{P}_{\mathbf{x}_{r,k}^e}$ et $P_{K_{s,k}^e}$ sont respectivement associées à l'état et au paramètre $K_{s,k}^e$ à estimer. Leurs valeurs initiales représentent alors l'incertitude associée à l'état initial $\hat{\mathbf{x}}_{r,0}^e$ et à la valeur initiale de la raideur $\hat{K}_{s,0}^e$.

Jusqu'à présent, nous avons considéré que la raideur de l'environnement était fixe (bruit nul sur le paramètre $K_{s,k}^e$ dans la relation (3.2)). Cependant, la télé-opération peut s'effectuer aussi bien dans un espace qu'en interaction avec des objets de rigidité différentes (organe, muscle, les côtes). Ainsi, pour avoir la capacité d'estimer de grandes variations de K_s , la matrice de covariance $P_{K_{s,k}^e}$ sera remise à sa valeur initiale $P_{K_{s,0}^e}$ dès que le robot esclave se trouve en espace libre.

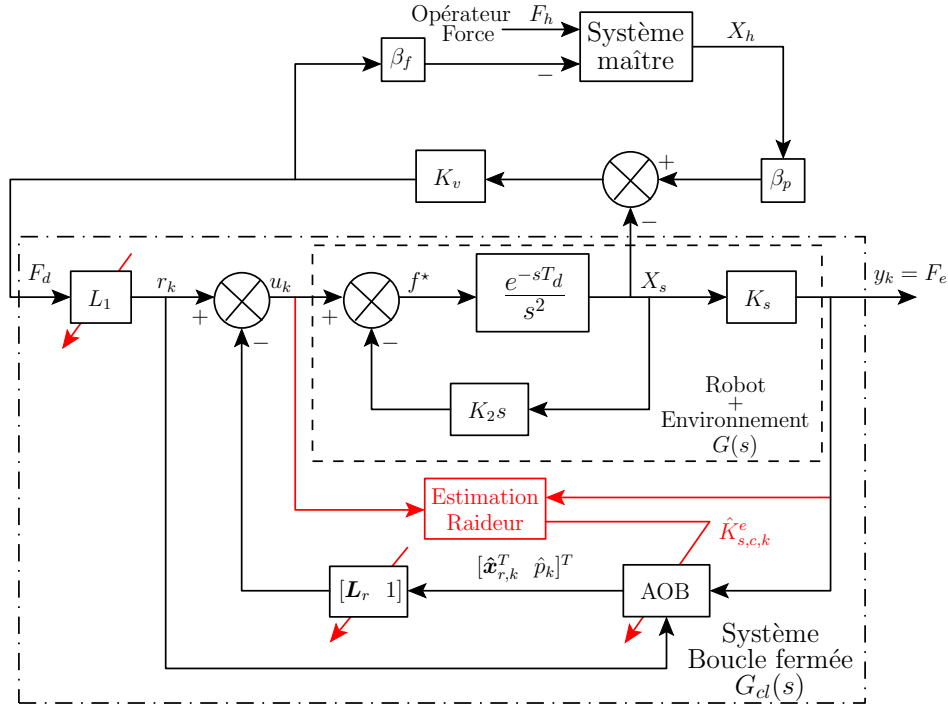


Figure 3.1 - Architecture de télé-opération et stratégie de commande adaptative en effort intégrant un observateur actif de l'état AOB, une technique de commande par retour d'état et une estimation en ligne de la raideur de l'environnement.

3.2.2.2 Adaptation de la stratégie de commande

Il est maintenant possible d'adapter la stratégie de commande en effort en fonction de la raideur estimée $\hat{K}_{s,k}^e$. Cependant lors d'une télé-opération en espace libre, l'effort mesuré F_e devient nul. La raideur estimée $\hat{K}_{s,k}^e$ par le filtre de Kalman étendu doit logiquement tendre vers 0 [N/m]. Ainsi pour prendre en compte les limitations physiques du manipulateur esclave **D2M2**, la raideur estimée $\hat{K}_{s,k}^e$ est limitée par une valeur minimale $K_{s,min}^e$. La raideur nominale estimée, notée $\hat{K}_{s,c,k}^e$ et prise en compte dans la commande, est donc

$$\hat{K}_{s,c,k}^e = \begin{cases} K_{s,min}^e & \text{si } \hat{K}_{s,k}^e < K_{s,min}^e \\ \hat{K}_{s,k}^e & \text{sinon} \end{cases}, \quad (3.16)$$

L'adaptation de la stratégie de commande en effort (voir §2.3.2.3 et §2.3.2.2) est alors effectuée avec la mise à jour de la matrice d'état Φ_r et du retour d'état L_r en fonction de la raideur nominale $\hat{K}_{s,c,k}^e$. Elle est réalisée suivant

$$\Phi_r = \Phi_{r,k} = \Phi_{r,k-1} + (\hat{K}_{s,c,k}^e - \hat{K}_{s,c,k-1}^e) \frac{\partial}{\partial K_s} \Phi_r \quad (3.17)$$

et

$$L_r = L_{r,k} = L_{r,k-1} + \frac{\hat{K}_{s,c,k-1}^e - \hat{K}_{s,c,k}^e}{\hat{K}_{s,c,k-1}^e \hat{K}_{s,c,k}^e} [l_1 \ l_2 \ 0 \ \dots \ 0] \quad (3.18)$$

respectivement dans des relations (2.67)-(2.68) pour l'estimation de l'état par l'observateur actif et de la relation (2.66) pour la commande par retour d'état estimé. Le gain

Paramètre	$K_{s,k}^e$	$K_{s,0}^e$	$K_{s,min}^e$	$F_{e,min}$	$Q_{x_{r,k,i,i}^e}$	R_k^e	$P_{x_{r,0}^e}$	$P_{K_{s,0}^e}$
Unité	[N/m]	[N/m]	[N/m]	[N]		[N ²]		[N ² /m ²]
y_z^e	estimé	200	200	0.2	10^{-12}	100	$Q_{x_{r,k}^e}$	10^6

Tableau 3.1 - Paramètres pour l'estimation de la raideur de l'environnement (avec $i = 1, \dots, 7$). L'unité de chaque élément de $Q_{x_{r,k}^e}$ et de $P_{x_{r,0}^e}$ dépend de l'état qui lui correspond ([N²] ou [N²/s²]).

d'estimation K_k de l'observateur actif (AOB) dans la relation (2.67) est aussi mis à jour. Le calcul se fait en ligne suivant les relations (2.70)-(2.72).

Le schéma de télé-opération intégrant l'estimation en ligne de la raideur de l'environnement et la stratégie de commande adaptative en effort est donné sur la Figure 3.1.

3.2.2.3 Validation expérimentale de la commande adaptative

Dans un premier temps, nous avons validé expérimentalement la stratégie de commande adaptative en considérant uniquement le robot **D2M2** contrôlé en effort. Le schéma de télé-opération n'est donc pas mis en œuvre.

Initialement, le robot est arrêté à une position X_s . Nous lui imposons alors un échelon en effort F_d de -5 [N] suivant la direction z . Il se déplace donc jusqu'au contact avec un objet se trouvant dans son espace de travail. L'objet considéré est l'objet mou utilisé dans les expériences du Chapitre 2 (la balle en mousse illustrée sur la Figure 2.7(c)).

Pour cette expérience, les paramètres de réglage de la commande et de l'estimation d'état sont ceux utilisés dans le Chapitre 2 et présentés dans le Tableau 2.1. Par contre, le paramètre de raideur nominale $K_{s,n}$ n'est plus égal à 200 [N/m], mais devient égal à la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ donnée par la relation (3.16). Les différents paramètres d'estimation de la raideur K_s sont donnés dans le Tableau 3.1. Le choix des paramètres d'estimation est effectué de manière empirique en considérant que la raideur est l'élément le plus incertain (grande valeur de $P_{K_{s,0}^e}$ comparée aux éléments diagonaux de la matrice de covariance de l'état $Q_{x_{r,k}^e}$).

La Figure 3.2 présente les résultats obtenus pour les efforts, position, la raideur et la commande. Dès l'envoi de la première consigne en échelon, le robot se déplace jusqu'au contact avec la balle en mousse (cf. Figure 3.2(b)). Lors de ce premier déplacement, la raideur estimée $\hat{K}_s^e$ converge vers 0 [N/m] indiquant ainsi que le robot se déplace en espace libre (juste avant $t = 5.65$ [s]). La raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ est donc limitée à sa valeur minimale $K_{s,min}^e$. Une fois le contact avec l'environnement établi (à l'instant 5.65 [s]), les raideurs estimées $\hat{K}_s^e$ et $\hat{K}_{s,c}^e$ évoluent jusqu'à 350 [N/m]. Ensuite dès que l'effort mesuré F_e atteint son régime permanent égal à F_d , la raideur estimée $\hat{K}_s^e$ converge aussitôt vers 0 [N/m] et $\hat{K}_{s,c}^e$ est à nouveau limitée par $K_{s,min}^e$. Un comportement identique, illustrant l'échec de l'estimation, est reproduit lors du deuxième échelon en effort. Ce comportement peut être expliqué en analysant les efforts de commande sur la Figure 3.2(d). En effet, une fois que l'effort appliqué F_e devient égal à l'effort désiré F_d , la commande u_k aurait dû s'annuler (selon la fonction de transfert $G(s)$ du modèle donnée par la relation (2.16)). Or, cette commande se stabilise à une valeur d'environ -0.25 [N]. Cette dernière, étant utilisée par le filtre de Kalman, influe directement sur l'estimation $\hat{K}_s^e$ qui se trouve être inexacte. Ce comportement de la commande en effort peut être expliqué par la présence d'erreurs de

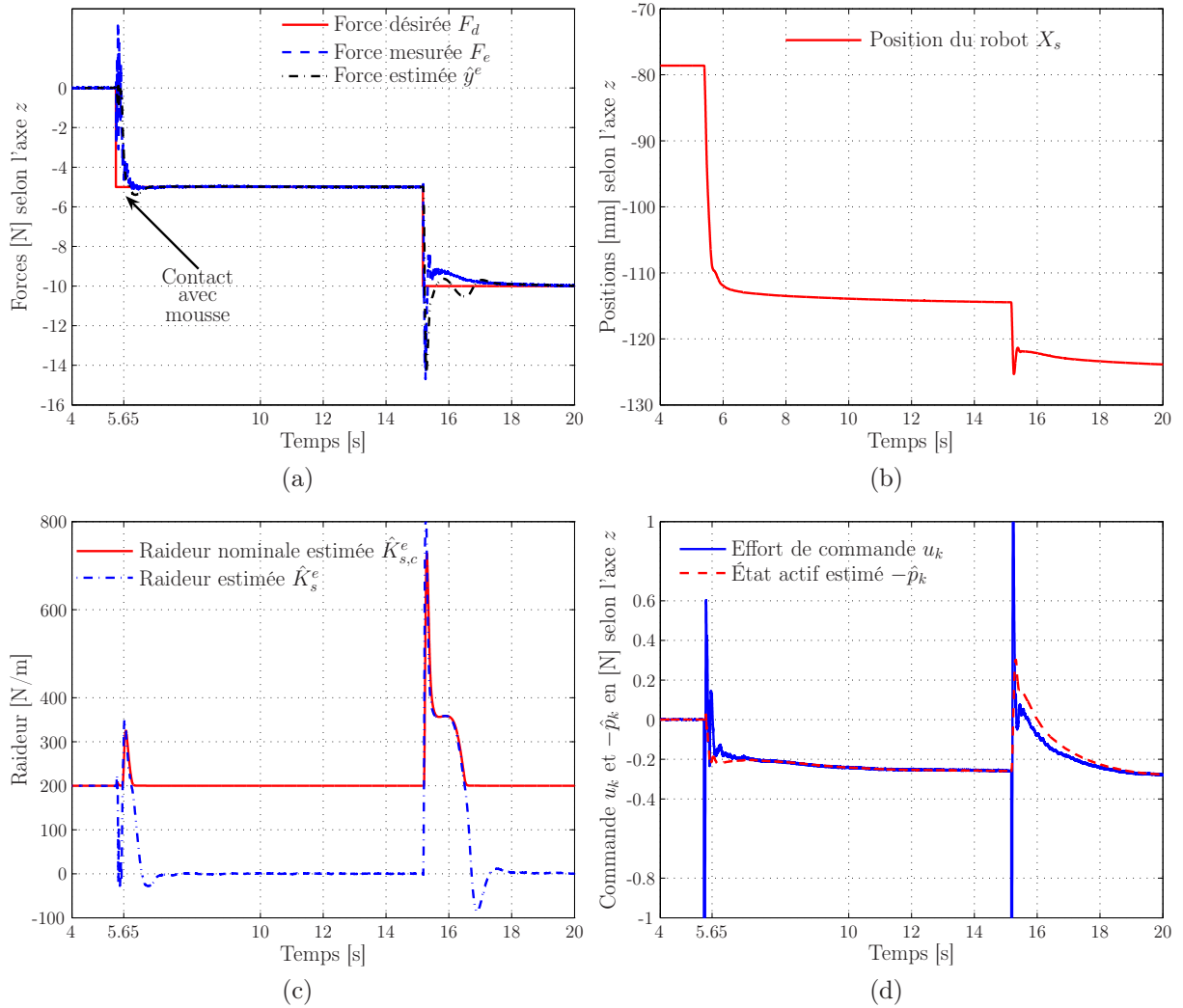


Figure 3.2 - Commande en effort du robot **D2M2** selon la direction z du repère R_0 avec une estimation en ligne de la raideur de l'environnement : (a) efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}^e$ et désiré F_d , (b) position mesurée X_s , (c) raideurs estimée $\hat{K}_s^e$ et nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ et (d) état actif estimé $-\hat{p}_k$ et commande u_k .

modélisation du robot **D2M2**. En effet, dans ces conditions et afin de maintenir, l'effort appliqué F_e , l'entrée u_k est non nulle pour compenser ces erreurs.

Dans le paragraphe suivant, nous proposons d'identifier ses erreurs de modélisation et de compenser leur effet dans la stratégie d'estimation par le filtre de Kalman étendu.

3.2.3 Compensation des erreurs de modélisation

Le filtre de Kalman étendu se base sur une représentation d'état du système dans laquelle des erreurs d'estimation de la raideur K_s de l'environnement et de modélisation du robot esclave peuvent apparaître. Ces dernières peuvent être dues à une erreur d'estimation des paramètres dynamiques $\mathbf{M}_x, \mathbf{V}_x \dots$ du robot esclave et donc à un mauvais découplage non linéaire (cf. Chapitre 2, §2.3.2.1). Ainsi, nous développerons les différentes phases d'estimation du filtre de Kalman étendu afin de mettre en évidence ces erreurs. Nous proposerons une stratégie permettant de compenser leur effet.

3.2.3.1 Représentation et compensation des erreurs de modélisation

Considérons U_k l'erreur de prédiction de la sortie y_k permettant la mise à jour de l'état dans le filtre de Kalman étendu donné par les relations (3.4)-(3.5). Elle est donnée par

$$U_k = y_k - \mathbf{C}_r \hat{\mathbf{x}}_{r,k|k-1}^e \quad (3.19)$$

dans laquelle le terme $\mathbf{C}_r \hat{\mathbf{x}}_{r,k|k-1}^e$ représente une prédiction de l'effort mesuré y_k .

Or, en se reportant à la relation (2.2), l'effort mesuré selon une direction donnée de l'espace de travail du robot est

$$y_k = F_e = K_s X_s. \quad (3.20)$$

où X_s est la position opérationnelle du robot obtenue à partir de sa configuration articulaire $\mathbf{q}$ et de son modèle géométrique.

En se référant à (3.20), l'effort prédit $\mathbf{C}_r \hat{\mathbf{x}}_{r,k|k-1}^e$ peut être réécrit suivant la relation

$$\hat{y}_{k|k-1}^e = \hat{K}_{s,k|k-1}^e \hat{X}_{s,k|k-1}, \quad (3.21)$$

dans laquelle $\hat{X}_{s,k|k-1}$ est une prédiction de la position opérationnelle X_s du robot. En réécrivant la relation (3.21), l'effort prédit $\hat{y}_{k|k-1}^e$ s'exprime sous la forme

$$\hat{y}_{k|k-1}^e = \hat{K}_{s,k|k-1}^e X_s - \hat{K}_{s,k|k-1}^e (X_s - \hat{X}_{s,k|k-1}). \quad (3.22)$$

Ainsi, l'erreur de prédiction U_k donnée par (3.19) peut également être donnée selon la forme

$$U_k = y_k - \hat{y}_{k|k-1}^e = (K_s - \hat{K}_{s,k|k-1}^e) X_s + \hat{K}_{s,k|k-1}^e (X_s - \hat{X}_{s,k|k-1}), \quad (3.23)$$

dans laquelle elle est composée, d'une part des erreurs de prédiction associées à la raideur K_s , données par $(K_s - \hat{K}_{s,k|k-1}^e)$ et d'autre part des erreurs de prédiction de la position X_s du robot, données par $(X_s - \hat{X}_{s,k|k-1})$. Ces dernières, si elles existent, apparaissent suite à une erreur de modélisation dynamique du robot esclave (découplage non linéaire). Elles peuvent dégrader les performances du filtre de Kalman étendu comme cela a été montré dans l'expérience précédente (cf. Figure 3.2).

L'effet de ces erreurs peut être compensé dans la phase de prédiction de $\hat{y}_{k|k-1}^e$ en considérant l'entrée du filtre de Kalman étendu $\Gamma_r u_{k-1}$ écrite de la façon suivante :

$$\Gamma_r u_{k-1} + \hat{K}_{s,k|k-1}^e \mathbf{n}(X_s - \hat{X}_{s,k|k-1}), \quad (3.24)$$

où $\mathbf{n}$ est un gain d'estimation calculé grâce à un estimateur de la position X_s du robot esclave. Le terme $\hat{K}_{s,k|k-1}^e \mathbf{n}(X_s - \hat{X}_{s,k|k-1})$ ajouté à l'entrée permet de compenser les erreurs de modélisation qui apparaissent dans l'effort prédit $\hat{y}_{k|k-1}^e$ donné par la relation (3.22).

La phase de prédiction du filtre de Kalman étendu donnée par la relation (3.4) devient alors :

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{r,k|k-1}^e \\ \hat{K}_{s,k|k-1}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_r^e(\hat{K}_{s,k-1}^e) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{r,k-1}^e \\ \hat{K}_{s,k-1}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{\Gamma}_r \\ 0 \end{bmatrix} u_{k-1} + \hat{K}_{s,k|k-1}^e \mathbf{n}(X_s - \hat{X}_{s,k|k-1}) \quad (3.25)$$

Dans le paragraphe suivant, nous développerons la procédure retenue pour calculer la prédiction $\hat{X}_{s,k|k-1}$ de la position X_s du robot.

3.2.3.2 Estimation de l'état en position

L'estimation de la position X_s du robot, se base sur un modèle double intégrateur parfaitement découplé donné par la relation (2.14) avec une boucle interne en vitesse de gain K_2 . La fonction de transfert reliant l'effort de commande u à la position X_s du robot est alors donnée par

$$G_p(s) \approx \frac{e^{-sT_d}}{s(s + K_2)}. \quad (3.26)$$

À partir de cette fonction de transfert, nous définissons deux variables d'état $x_{p,1}(t) = X_s(t)$ et $x_{p,2}(t) = \dot{X}_s(t)$ qui représentent respectivement la position et la vitesse du robot. La représentation d'état du modèle en position est alors donnée par

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{p,1}(t) \\ \dot{x}_{p,2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{p,1}(t) \\ x_{p,2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t - T_d). \quad (3.27)$$

où $T_d = d \times h$ est le retard propre du robot. Sa forme discrète est

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{p,k} = \Phi_p \mathbf{x}_{p,k-1} + \mathbf{\Gamma}_p u_{k-1} \\ X_s = \mathbf{C}_p \mathbf{x}_{p,k} \end{cases}, \quad (3.28)$$

dans laquelle le vecteur d'état de dimension $((2 + d) \times 1)$ est

$$\mathbf{x}_{p,k} = \begin{bmatrix} x_{p,1,k} & x_{p,2,k} & u_{k-d} & \dots & u_{k-2} & u_{k-1} \end{bmatrix}^T, \quad (3.29)$$

La matrice d'état de dimension $((2 + d) \times (2 + d))$ est

$$\Phi_p = \begin{bmatrix} \Phi_1 & \mathbf{\Gamma}_{1,p} & \mathbf{\Gamma}_0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.30)$$

où

$$\mathbf{\Gamma}_{1,p} = \begin{bmatrix} \frac{K_2 h - 1 + e^{-K_2 h}}{K_2^2} \\ \frac{1 - e^{-K_2 h}}{K_2} \end{bmatrix}. \quad (3.31)$$

X_s est estimé par un filtre de Kalman en considérant des bruits blancs Gaussiens indépendants et de moyennes nulles sur l'état $\mathbf{x}_{p,k}$. L'étape de prédiction fournit

$$\hat{\mathbf{x}}_{p,k|k-1} = \Phi_p \hat{\mathbf{x}}_{p,k-1} + \Gamma_p u_{k-1} \quad (3.32)$$

et celle d'estimation

$$\hat{\mathbf{x}}_{p,k} = \hat{\mathbf{x}}_{p,k|k-1} + \mathbf{n}(X_s - \mathbf{C}_r \hat{\mathbf{x}}_{p,k|k-1}). \quad (3.33)$$

La position estimée $\hat{X}_{s,k}$ est alors donnée par

$$\hat{X}_{s,k} = \mathbf{C}_r \hat{\mathbf{x}}_{p,k}. \quad (3.34)$$

La prédiction $\hat{X}_{s,k|k-1}$ utilisée dans la relation (3.24) pour compenser l'effet des erreurs de modélisation (3.24) est donnée par

$$\hat{X}_{s,k|k-1} = \mathbf{C}_r \hat{\mathbf{x}}_{p,k|k-1}. \quad (3.35)$$

$\mathbf{n}$ est alors le gain d'estimation de Kalman calculé par la même procédure que celle donnée par les relations (3.7)-(3.9) en considérant les matrices d'état et de covariance appropriées.

3.2.3.3 Validation expérimentale de la commande adaptative avec prise en compte des erreurs de modélisation

La validation expérimentale de la stratégie de commande adaptative avec prise en compte des erreurs de modélisation est réalisée à partir d'une expérience similaire à celle présentée précédemment. Elle consiste à imposer un échelon en effort $F_d = -5$ [N] que le robot **D2M2**, contrôlé en effort, doit appliquer sur un objet mou. Lors de cette expérience, la raideur K_s de l'environnement est estimée en ligne par le filtre de Kalman étendu avec compensation des erreurs de modélisation du robot (relation (3.24)).

Les paramètres de commande en effort ainsi que d'estimation pour le filtre de Kalman étendu sont identiques à ceux considérés précédemment. Ils sont donnés dans les Tableaux 2.1 et 3.1. La compensation des erreurs de modélisation est obtenue à travers le gain d'estimation $\mathbf{n}$. En supposant que le modèle en position (3.28) est invariant dans le temps, ce gain a été calculé hors ligne en simulation. Après convergence du filtre (3.32)-(3.35), le gain d'estimation est

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} 0.27 & 1.3 \times 10^{-4} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (3.36)$$

Les résultats expérimentaux sont donnés sur la Figure 3.3. Avant la prise de contact, $\hat{K}_s^e$ converge vers 0 [N/m] donc $\hat{K}_{s,c}^e = K_{s,min}^e = 200$ [N/m]. Dès que le contact avec l'environnement s'établit, la raideur estimée $\hat{K}_s^e$ évolue jusqu'à une valeur finale de 600 [N/m]. Par effet de la compensation des erreurs de modélisation, cette estimation se réalise même si la commande $u_{k,z}$ n'est pas nulle (Figure 3.3(d)). Avec la correction de gain $\mathbf{n}$, l'erreur d'estimation de la position X_s est faible. Lors du deuxième et troisième échelon en effort F_d , la réponse sans dépassement ni oscillation de l'effort mesuré F_e montre que la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ est proche de la raideur réelle K_s de l'objet.

Ces résultats valident la stratégie d'estimation de la raideur K_s de l'environnement. Cette approche peut à présent être utilisée dans le schéma de télé-opération pour analyser l'interaction avec un environnement dont les éléments sont de rigidité différente et élevée.

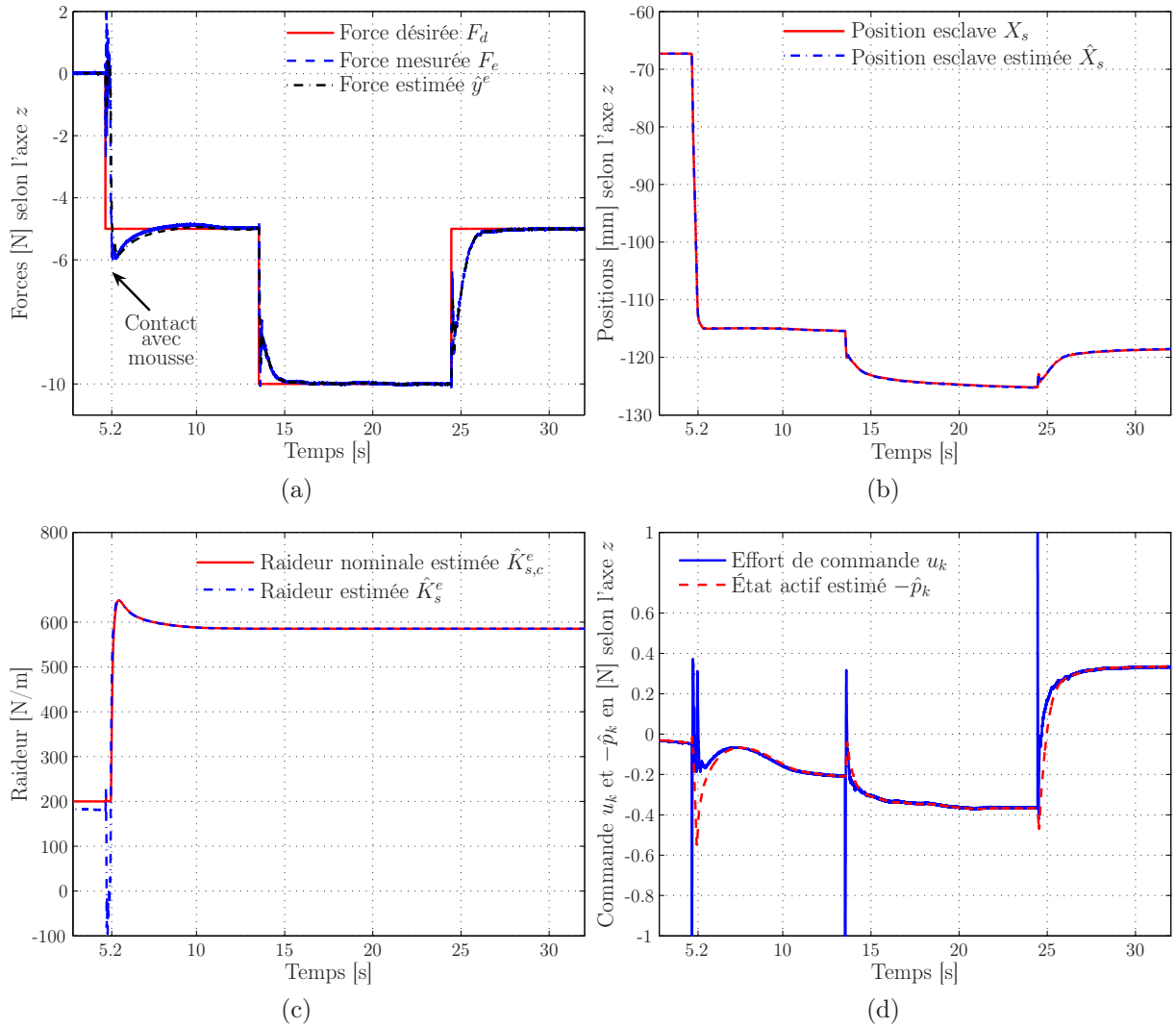


Figure 3.3 - Commande en effort du robot **D2M2** selon la direction z du repère R_0 avec une estimation en ligne de la raideur de l'environnement et la prise en compte des erreurs de modélisation : (a) efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}^e$ et désiré F_d , (b) positions mesurée X_s et estimée $\hat{X}_s$, (c) raideurs estimée $\hat{K}_s^e$ et nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ et (d) état actif estimé $-\hat{p}_k$ et commande u_k .

3.2.4 Télé-opération et estimation en ligne de la raideur de l'environnement

Le réglage des paramètres de l'estimation et de la commande est identique à celui utilisé dans les manipulations précédentes (cf. Tableaux 2.1 et 3.1 et relation (3.36)). Les paramètres de télé-opération sont aussi identiques à ceux utilisés dans le Chapitre 2 et donnés par la relation (2.75). Lors de ces expériences de télé-opération, nous réalisons cette fois des interactions avec un environnement composé d'une balle en mousse, d'un ballon en cuir à moitié rempli d'air et d'un livre (voir Figure 2.7(c)). Ils sont placés à des endroits différents de l'espace de travail du robot. Nous considérons uniquement les interactions suivant la direction z du repère R_0 . Ainsi, l'opérateur télé-opère le robot pour appliquer un effort sur un objet. Après quelques secondes, il soulève le robot esclave et réalise un déplacement en espace libre selon les directions x , y et z de R_0 pour atteindre l'objet suivant.

La Figure 3.4 montre les déplacements effectués et imposés par l'opérateur selon les trois directions du robot esclave. Selon les directions x et y , la télé-opération se réalise en espace libre dans des conditions confortables comme cela a été évoqué dans le Chapitre 2 (§2.4.2.1). Pour la télé-opération en espace libre selon la direction z , nous remarquons que la raideur estimée est $\hat{K}_s^e \approx 0$ [N/m] (Figure 3.6(b)) donc $\hat{K}_{s,c}^e = \hat{K}_{s,min} = 200$ [N/m]. Ainsi, les performances selon la direction z restent, elles aussi, identiques à celles obtenues dans le Chapitre 2 (§2.4.2.1).

La Figure 3.5 montre les efforts appliqués par le robot esclave sur son environnement. Grâce à l'architecture de télé-opération, au retour en effort et à la stratégie d'estimation en ligne de la raideur de l'environnement, l'opérateur est capable de déplacer le robot esclave dans un espace libre, d'interagir avec des objets de rigidité différente et de contrôler les efforts qui y sont appliqués.

Les évolutions de la raideur $\hat{K}_s^e$, des efforts $\hat{y}^e$ estimés par le filtre de Kalman étendu et de la matrice de covariance $\mathbf{P}_{K_s^e}$ sont données sur la Figure 3.6. La remise à sa valeur initiale $\mathbf{P}_{K_s^e_0}$ de la matrice de covariance $\mathbf{P}_{K_s^e}$ assure les estimations successives de la raideur de plusieurs objets différents.

3.2.5 Conclusion

L'intégration d'une stratégie d'estimation en ligne de la raideur de l'environnement ainsi que l'adaptation de la commande en effort ont permis d'améliorer la stabilité du schéma de télé-opération. Pour cela, nous avons choisi un estimateur de Kalman étendu utilisé en parallèle à la commande en effort du robot esclave **D2M2**. Cette stratégie d'estimation nous permet d'éviter la considération de la position de contact X_{s_0} , très souvent inconnue et variable dans le cas de la chirurgie mini-invasive robotisée. Nous avons également introduit une méthode de compensation des erreurs de modélisation du robot esclave. La télé-opération et l'interaction avec un environnement dont les éléments sont de rigidité différente a ainsi été réalisée avec succès. Grâce à une remise à une valeur initiale de la matrice de covariance du paramètre à estimer $\hat{K}_s^e$, les performances de télé-opération en espace libre ainsi que l'estimation de la raideur de plusieurs objets différents ont pu être assurées. Cette stratégie d'estimation en ligne de la raideur de l'environnement ainsi que les résultats présentés précédemment, ont fait l'objet d'une publication à ICAR'07 [Zarrad *et al.*, 2007a].

Cependant, au travers les résultats expérimentaux et en particulier ceux du suivi de trajectoire (cf. Figure 3.4(c)), on constate que la transparence du schéma de télé-opération

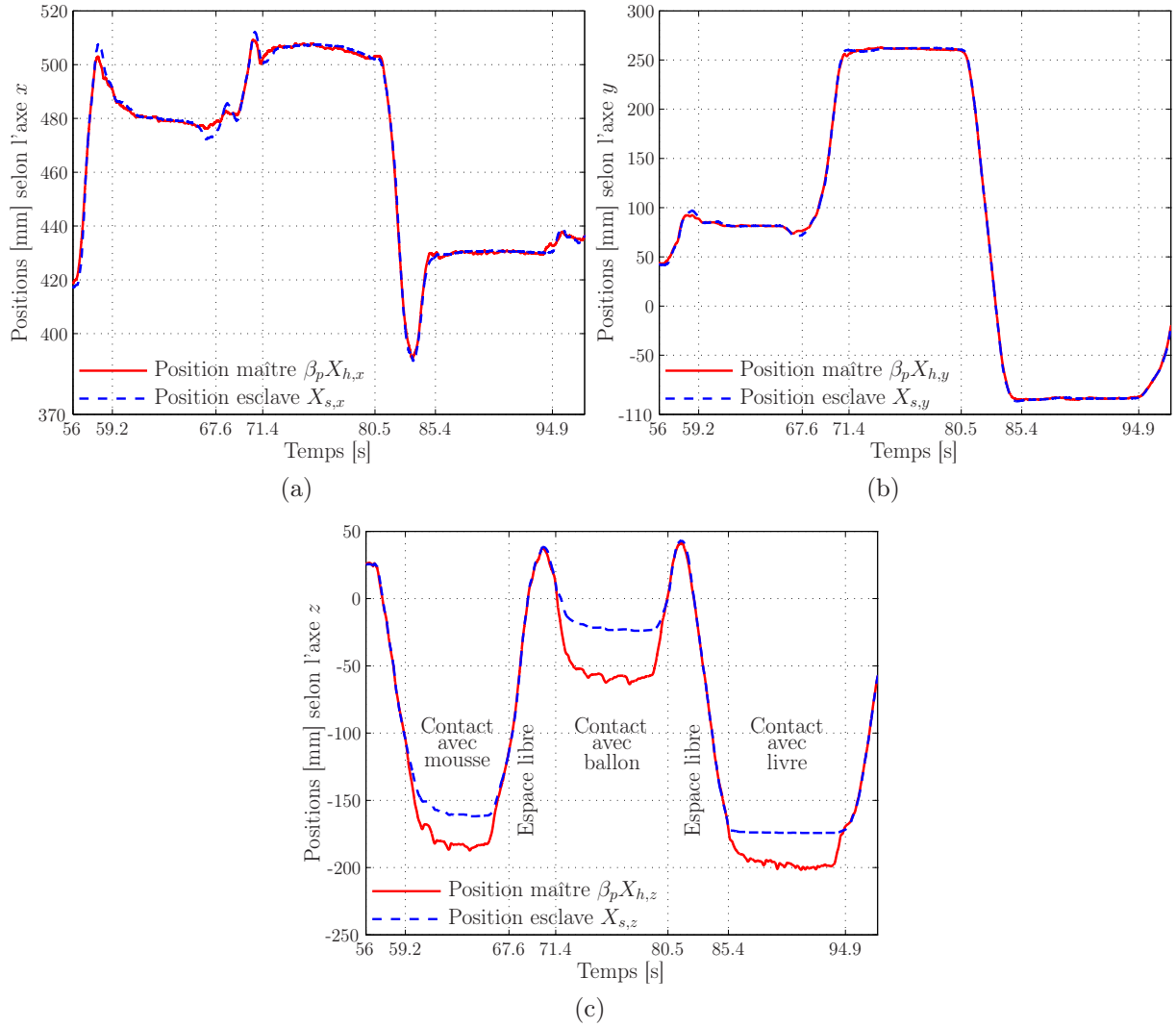


Figure 3.4 - *Suivi en position d'une trajectoire imposée par l'opérateur lors d'une téléopération avec estimation en ligne de la raideur de l'environnement et compensation des erreurs de modélisation suivant la direction z du repère R_0 : (a) suivi de trajectoire suivant la direction x , (b) suivi de trajectoire suivant la direction y et (c) suivi de trajectoire suivant la direction z du repère R_0 .*

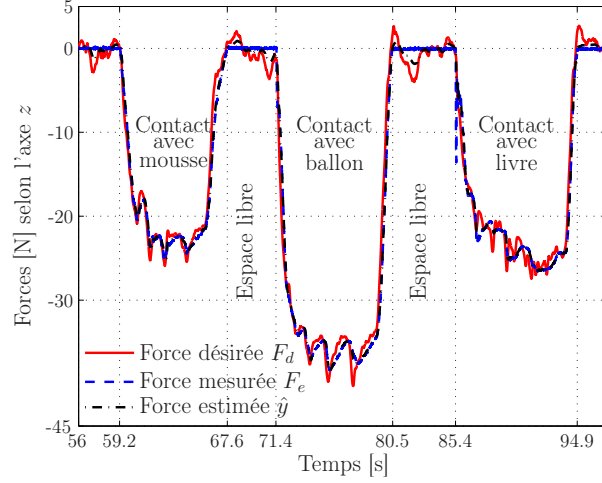


Figure 3.5 - Efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}_k$ et désiré F_d lors d'une télé-opération avec estimation en ligne de la raideur de l'environnement et compensation des erreurs de modélisation suivant la direction z du repère R_0 . $-\beta_f F_d$ représente l'effort ressenti par l'opérateur au niveau du bras haptique **PHANToM** 1.5.

n'est pas assurée lors d'une interaction avec l'environnement. En effet, lors d'un contact avec un objet rigide (livre), la position de la station maître varie par rapport à la position du robot. Les sensations perçues par l'opérateur ne représentent alors pas un contact avec un objet rigide. La transparence du schéma de télé-opération n'est donc pas assurée.

Dans les paragraphes suivants, nous proposons une étude complète du schéma de télé-opération en analysant la transparence obtenue. La définition d'une transparence désirée permettra d'améliorer les performances tout en conservant des marges de stabilité satisfaisantes.

3.3 Transparence et stabilité du schéma de télé-opération

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à la transparence et à la stabilité du schéma de télé-opération lorsque le robot esclave est en contact avec un environnement. Pour cela, nous supposons que la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ utilisée pour adapter la stratégie de commande en effort est proche de la raideur réelle K_s de l'environnement. Nous commencerons alors par montrer les résultats de transparence obtenus lors des expérimentations précédentes. Une transparence et des marges de stabilité désirées seront ensuite définies. Nous proposerons d'adapter le schéma de télé-opération en s'appuyant sur un compromis entre ces deux critères.

3.3.1 Transparence du schéma de télé-opération

Le schéma de télé-opération avec retour d'effort incluant la commande en effort et l'estimation en ligne de la raideur de l'environnement selon une direction de l'espace est donné sur la Figure 3.7. G_{cl} et G_{hp} représentent respectivement la fonction de transfert du système esclave donnée par la relation (2.49) et celle de la station maître. Cette dernière inclut l'interface haptique **PHANToM** 1.5 et l'opérateur.

Plusieurs travaux ont assimilé l'interface haptique ainsi que l'opérateur qui la manipule à deux systèmes différents de type masse-ressort-amortisseur [Zhu et Salcudean,

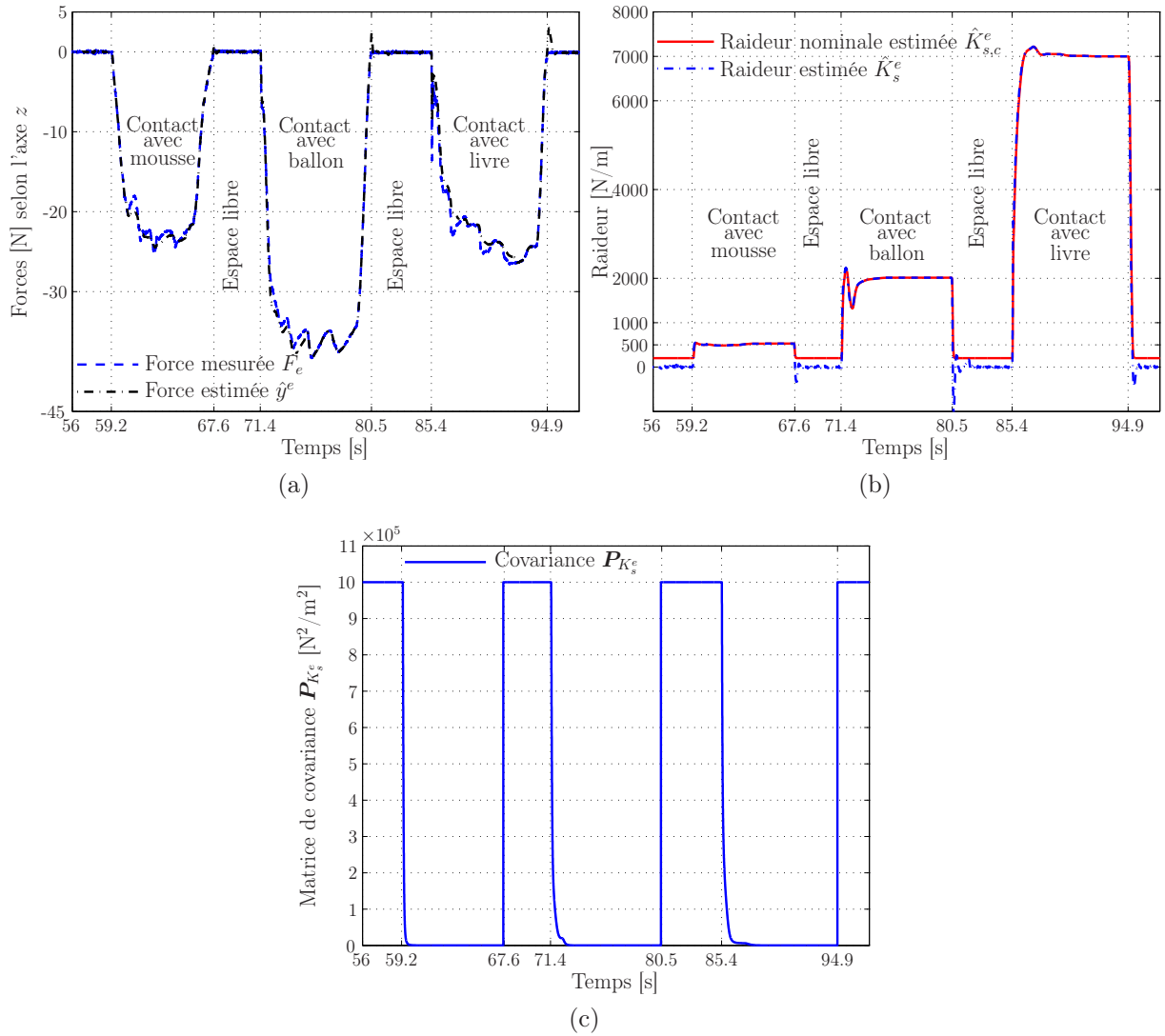


Figure 3.6 - Estimation en ligne de la raideur de l'environnement lors d'une prise de contact avec des objets de rigidité différente suivant l'axe z du repère R_0 : (a) efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}^e$ et désiré F_d , (b) raideurs estimée $\hat{K}_s^e$ et nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ et (c) matrice de covariance $\mathbf{P}_{K_s^e}$ relative à la raideur de l'environnement.

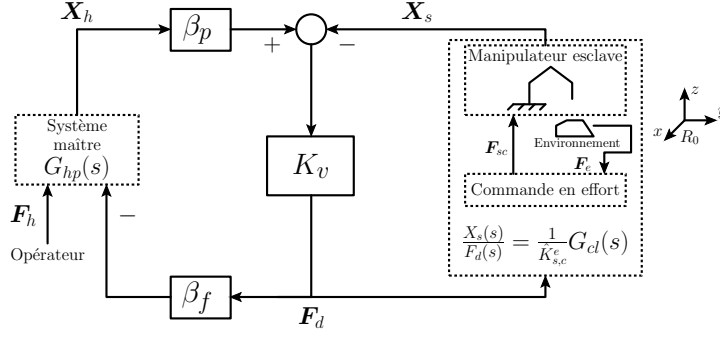


Figure 3.7 - Schéma de télé-opération position - position modifié utilisant une commande en effort et une stratégie d'estimation de la raideur de l'environnement.

1995], [Arcara et Melchiorri, 2002], [Tanner et Niemeyer, 2005]. Cependant et au vu des caractéristiques de l'interface haptique **PHANTOM** 1.5 (frottement et masse apparente très faibles), son effet peut être considéré comme négligeable par rapport à celui de l'opérateur [Yokokohji et Yoshikawa, 1994]. La station maître peut alors être modélisée par un seul système masse-ressort-amortisseur dont les caractéristiques respectives M_{hp} , C_{hp} et K_{hp} sont essentiellement dues à l'opérateur [Diolaiti *et al.*, 2005b], [Cortêsão *et al.*, 2006a]. Sa fonction de transfert G_{hp} est alors donnée par

$$G_{hp}(s) = \frac{1}{M_{hp}s^2 + C_{hp}s + K_{hp}} \quad (3.37)$$

dont l'entrée est la somme des efforts F_h et $-\beta_f F_d$ et la sortie est la position X_h de la station maître.

La détermination des différents paramètres de G_{hp} nécessite une étape d'identification et une plate-forme expérimentale dédiée [Speich *et al.*, 2005]. Des résultats obtenus à la suite de quelques travaux menés dans ce sens montrent des paramètres identifiés dont les valeurs nominales sont très différentes. Cette large variation est due aux opérateurs considérés [Kuchenbeker *et al.*, 2003], à la direction du déplacement effectué [Speich *et al.*, 2005], à l'interface haptique utilisée [Çavuşoğlu *et al.*, 2002] ou encore à la manière avec laquelle la manipulation est réalisée [Wagner et Howe, 2005]. Pour la suite des travaux présentés dans ce manuscrit, nous considérons le cas le plus défavorable où l'opérateur manipule et tient fermement l'effecteur de l'interface haptique. Nous choisissons alors les caractéristiques proposées par Lawrence [Lawrence, 1993], utilisées également dans [Fite *et al.*, 2001] données par :

$$M_{hp} = 17.5 \text{ [Kg]} , \quad C_{hp} = 175 \text{ [Ns/m]} \quad \text{et} \quad K_{hp} = 175 \text{ [N/m]}. \quad (3.38)$$

D'après la Figure 3.7 et en considérant $\hat{K}_{s,c}^e \approx K_s$, l'impédance Z_t transmise à l'opérateur lorsque le robot esclave exerce un effort sur l'environnement est donnée par

$$\frac{F_h}{X_h} = G_{hp}^{-1} + \frac{K_v \beta_f \beta_p}{1 + G_{cl} K_v K_s^{-1}} = Z_t, \quad (3.39)$$

où G_{cl} est la fonction de transfert en boucle fermée reliant l'effort désiré F_d à l'effort appliqué par le robot esclave F_e . Nous rappelons qu'elle est donnée par

$$G_{cl} = \frac{F_e}{F_d} = \frac{1}{(1 + T_{cl}s)^2} e^{-sT_d}. \quad (3.40)$$

Par rapport à la représentation sous forme de matrice *hybride* (relation (1.1)), Z_t représente le paramètre h_{11} . Nous nous intéressons uniquement à la transparence du schéma de télé-opération; il est donc inutile de calculer les autres éléments de la matrice (voir §1.2.1.3).

À basse fréquence, l'impédance transmise à l'opérateur devient

$$Z_t(s=0) = K_{hp} + \frac{K_v \beta_f \beta_p}{K_s + K_v} K_s, \quad (3.41)$$

dans laquelle nous posons

$$\alpha = \frac{K_v \beta_f \beta_p}{K_s + K_v}. \quad (3.42)$$

À partir de (3.41) et (3.42), il est possible de définir une transparence désirée Z_t^d donnée par

$$Z_t^d = K_{hp} + \alpha^d K_s. \quad (3.43)$$

Cette dernière indique qu'en réalisant la télé-opération et l'interaction avec un environnement distant, l'opérateur ressent simultanément sa main, l'effecteur du bras haptique **PHANTOM** et une raideur $\alpha^d K_s$ proportionnelle à celle de l'environnement.

Dans des conditions idéales, le schéma de télé-opération doit être totalement transparent pour l'opérateur. Ce dernier perçoit alors des sensations comme s'il agissait directement sur l'environnement distant (ie. $Z_t^d = K_{hp} + K_s$). α^d est alors égal à 1. Cependant, afin de minimiser l'effet de fatigue et d'être capable de différencier plusieurs objets de rigidité différente (organes, muscle, côte ou instrument), une mise à l'échelle de la raideur de l'environnement avec un α^d fixe inférieur à 1 est préférée [Lawrence, 1993]. Nous définissons alors une transparence désirée du schéma de télé-opération donnée par la relation (3.43) dans laquelle

$$\alpha^d \approx C_{st} < 1, \quad (3.44)$$

où C_{st} est une constante.

La transparence du schéma de télé-opération peut être analysée en réalisant le tracé de la réponse fréquentielle correspondant aux deux impédances Z_t et Z_t^d [Lawrence, 1993], [Tanner et Niemeyer, 2005]. La transparence est alors assurée si la réponse fréquentielle de l'impédance Z_t transmise à l'opérateur se situe dans une bande $Z_t^d \pm 3$ [dB] [Fite *et al.*, 2001]. La Figure 3.8 montre, pour différentes valeurs de K_s , le tracé fréquentiel de ces deux impédances respectivement données par les relations (3.39) et (3.43)-(3.44) dans lesquelles nous avons fixé $\alpha^d = \beta_f \beta_p$. Nous pouvons ainsi remarquer que quelle que soit la raideur K_s de l'environnement, l'impédance Z_t transmise à l'opérateur est peu variable (entre $\simeq 47$ et $\simeq 50$ [dB]). Ce dernier perçoit alors des sensations toujours identiques et représentatives d'un environnement mou. De plus, pour un environnement de raideur $K_s \geq 1000$ [N/m], l'impédance transmise est en dehors de la bande $Z_t^d \pm 3$ [dB]. La transparence du schéma de télé-opération n'est donc plus satisfaisante. Ce résultat est justifié par le fait que le paramètre de mise à l'échelle α dans (3.42) dépend de la raideur K_s de l'environnement et de la raideur virtuelle K_v choisie entre la station maître et esclave. Pour une raideur virtuelle K_v constante, lorsque le robot est en contact avec des objets de rigidité différente, le paramètre de mise à l'échelle α varie selon K_s . La contrainte définie par la relation (3.44) imposant une mise à l'échelle fixe de l'impédance transmise Z_t par rapport à la raideur K_s de l'environnement n'est alors plus garantie.

Pour assurer une transparence désirée, il est donc nécessaire de mettre à jour la raideur virtuelle K_v en fonction de la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$. Cette adaptation doit

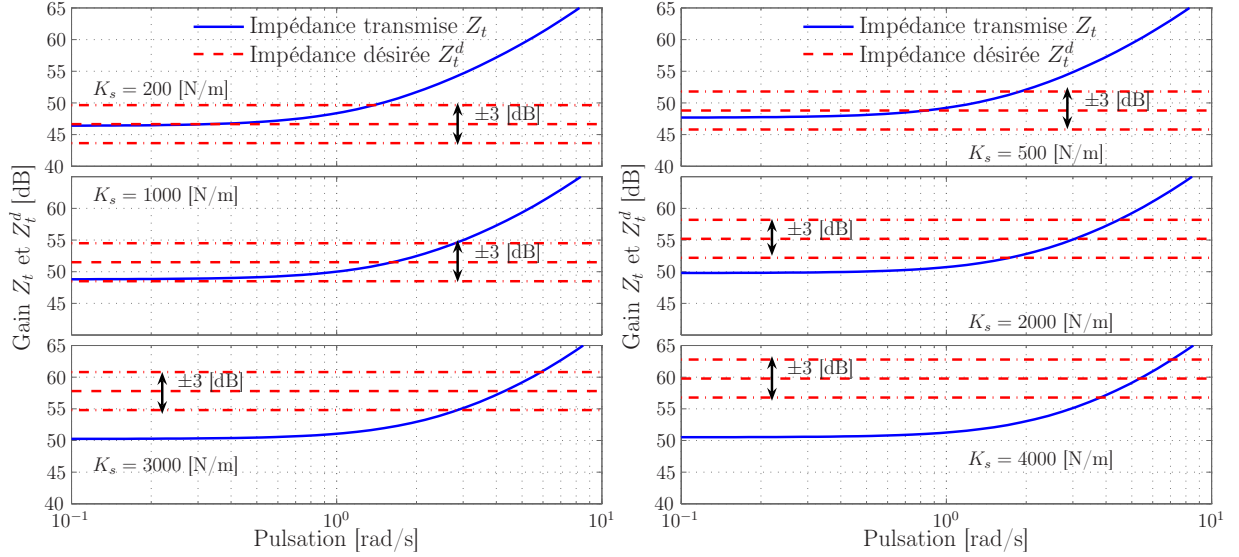


Figure 3.8 - Réponse fréquentielle de l'impédance Z_t transmise à l'opérateur comparée à celle désirée Z_t^d (avec $\alpha^d = \beta_f \beta_p$) pour différentes valeurs de la raideur K_s de l'environnement et pour une raideur virtuelle $K_v = 1000$ [N/m] constante. La bande à $Z_t^d \pm 3$ [dB] est illustrée.

cependant prendre en compte non seulement les limitations physiques des deux systèmes maître et esclave mais surtout la stabilité du schéma de télé-opération. Dans le paragraphe suivant, une étude de la stabilité du schéma de télé-opération en fonction de la raideur virtuelle K_v sera réalisée. L'adaptation de la raideur virtuelle K_v se fera suivant un compromis entre la stabilité et la transparence du schéma de télé-opération.

3.3.2 Stabilité du schéma de télé-opération

Dans le schéma de télé-opération de la Figure 3.7, la station maître G_{hp} possède deux entrées et une sortie. Les entrées sont les efforts F_h et $-\beta_f F_d$. La sortie est la position X_h . Cette dernière peut être divisée en deux éléments indépendamment générés par les deux entrées distinctes de la station maître [Fite *et al.*, 2004]. Elle s'écrit alors

$$X_h = X_h^v - X_h^{inv}, \quad (3.45)$$

dans laquelle X_h^v est la position volontaire de l'opérateur générée par l'effort F_h et X_h^{inv} est la position involontaire générée par le retour haptique $\beta_f F_d$ et imposée à l'opérateur. La Figure 3.9 montre une nouvelle représentation du schéma de télé-opération dans laquelle sont distinguées les deux positions volontaire et involontaire de la station maître.

Cette nouvelle représentation met en évidence un sous-système qui relie la position volontaire de l'opérateur X_h^v (multipliée par le facteur d'échelle β_p) à la position du robot esclave X_s . La fonction de transfert qui lui correspond est

$$\frac{X_s}{\beta_p X_h^v} = \frac{K_v G_{cl} K_s^{-1}}{1 + K_v \beta_p \beta_f G_{hp} + K_v G_{cl} K_s^{-1}}. \quad (3.46)$$

La stabilité est alors étudiée à partir de la fonction de transfert en boucle ouverte [Ogata, 2002]

$$H = \frac{K_v}{1 + K_v \beta_p \beta_f G_{hp}} G_{cl} K_s^{-1}. \quad (3.47)$$

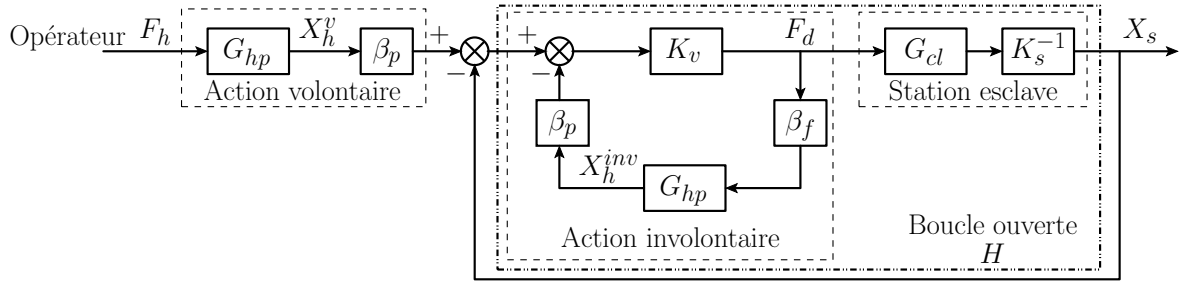


Figure 3.9 - Schéma de télé-opération avec retour en effort faisant apparaître la position volontaire X_h^v et involontaire X_h^{inv} de la station maître. Ces deux positions sont respectivement générées par l'effort de l'opérateur F_h et par le retour en effort $\beta_f F_d$.

Le gain et la phase de H sont respectivement donnés en décibels [dB] et en degré par

$$\begin{cases} \|H\|_{dB} = \|H_1\|_{dB} + \|H_2\|_{dB} \\ \varphi_H = \varphi_{H_1} + \varphi_{H_2} \end{cases}, \quad (3.48)$$

où

$$H_1 = K_v G_{cl} K_s^{-1} \text{ et } H_2 = \frac{1}{1 + K_v \beta_p \beta_f G_{hp}}. \quad (3.49)$$

En considérant des paramètres nominaux $\hat{K}_{s,c}^e = K_s = 200$ [N/m] et $K_v = 1000$ [N/m], la Figure 3.10 illustre les lieux de transfert dans le plan de Bode de la fonction de transfert H ainsi que ceux des deux sous-systèmes H_1 et H_2 . Sur la Figure 3.10(a) et (b), nous avons respectivement représenté les marges de phase et de gain du système H et du sous-système H_1 . Sur la Figure 3.10(c), le gain et la phase du sous-système H_2 ont été donnés aux pulsations $w = 26.9$ et 87 [rad/s] qui correspondent aux pulsations pour lesquelles les marges de stabilité du système total H ont été définies.

H_1 est un sous-système du deuxième ordre avec retard, dont le gain statique est égal à $K_v K_s^{-1}$. Les marges de phase $M_\varphi(H_1)$ et de gain $M_G(H_1)$ correspondantes sont données par :

$$\begin{cases} M_\varphi(H_1) = -\frac{180}{\pi}(\arctan(\frac{2T_{cl}w_1}{1 - T_{cl}^2w_1^2}) - T_d w_1) + 180^\circ \\ M_G(H_1) = -20 \log_{10}(K_v K_s^{-1}) + 20 \log_{10}(1 + T_{cl}^2 w_1^2) \end{cases}, \quad (3.50)$$

où w_1 et w_2 sont respectivement les pulsations pour lesquelles $\|H_1\|_{dB} = 0$ [dB] et $\varphi_{H_1} = -180$ [deg]. Elles sont données par :

$$\begin{cases} w_1 = w_{\|H_1\|_{dB}=0} = \sqrt{K_v K_s^{-1} - 1}/T_{cl} \\ w_2 = w_{\varphi_{H_1}=-180^\circ} = \sqrt{2/T_d T_{cl}} = 86.9 [\text{rad/s}] \end{cases}. \quad (3.51)$$

Nous remarquons que la pulsation w_2 dépend du retard propre et de la constante de temps du système esclave. Elle ne dépend ni de la raideur K_s de l'environnement ni de la raideur virtuelle K_v . Ainsi, pour une constante de temps T_{cl} donnée, la marge de gain du sous-système H_1 sera toujours établie à la pulsation $w_2 = 86.9$ [rad/s].

H_2 est un sous-système du deuxième ordre indépendant de la raideur K_s de l'environnement mais dépendant de la raideur K_v . La Figure 3.11 montre le lieu de transfert dans

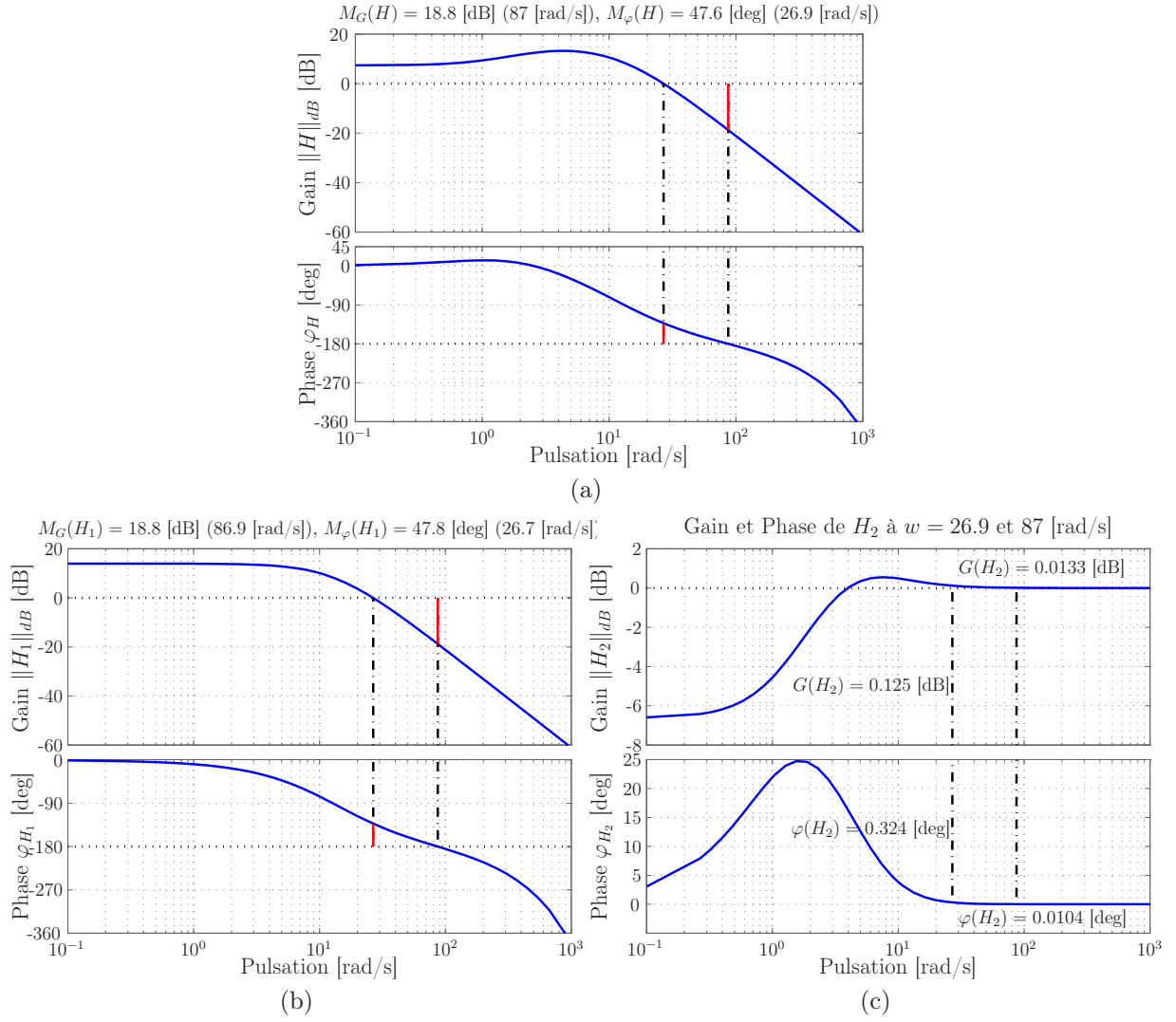


Figure 3.10 - Réponse fréquentielle des différents systèmes constituant le schéma de télé-opération en boucle ouverte reliant la position volontaire de l'opérateur à la position du robot esclave : (a) réponse fréquentielle du système $H = H_1 H_2$ en boucle ouverte reliant la position volontaire de l'opérateur à la position du robot esclave, (b) réponse fréquentielle du sous-système H_1 et (c) réponse fréquentielle du sous-système H_2 .

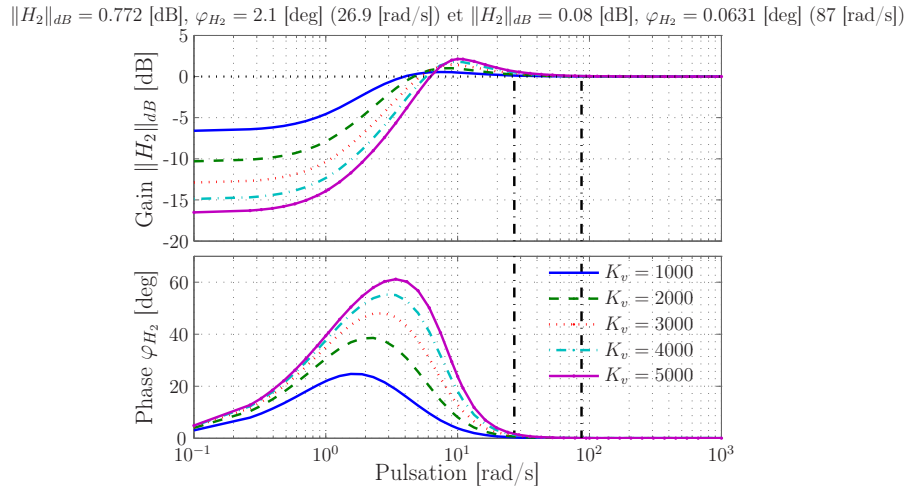


Figure 3.11 - Réponse fréquentielle du sous-système H_2 constituant le système en boucle ouverte H reliant la position volontaire de l'opérateur à celle du robot esclave pour différentes valeurs de la raideur virtuelle K_v .

le plan de Bode pour différentes valeurs de K_v . Quelque soit la valeur de K_v , son gain $\|H_2\|_{dB}$ et sa phase $\varphi(H_2)$ sont

$$\begin{cases} \|H_2\|_{dB}(w) \approx 0 & \text{pour } w = w_2 \\ \varphi_{H_2}(w) \geq 0 & \forall w \end{cases} \quad (3.52)$$

Les marges de gain et de phase de la fonction de transfert $H = H_1 H_2$ sont alors

$$\begin{cases} M_G(H) \approx M_G(H_1) \\ M_\varphi(H) \geq M_\varphi(H_1) \end{cases} \quad (3.53)$$

Une condition suffisante de stabilité du système H est alors obtenue avec des marges de stabilité satisfaisantes du sous-système H_1 . Cette dernière, donnée par

$$\begin{cases} M_\varphi(H_1) = -\frac{180}{\pi} \left(\arctan\left(\frac{2\sqrt{K_v K_s^{-1} - 1}}{2 - K_v K_s^{-1}}\right) - T_d \sqrt{K_v K_s^{-1} - 1} \right) + 180^\circ \\ M_G(H_1) = -20 \log_{10}(K_v K_s^{-1}) + 32.8408 \text{ [dB]} \end{cases} \quad (3.54)$$

dépend du quotient des deux raideurs $K_v K_s^{-1}$. Pour améliorer la transparence du schéma de télé-opération, cette marge de stabilité doit être prise en compte lors de l'adaptation de la raideur virtuelle K_v en fonction de la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e = K_s$ de l'environnement. Cette adaptation est proposée dans le paragraphe suivant.

3.3.3 Compromis stabilité/transparence et commande adaptative

À partir des impédances transmise Z_t et désirée Z_t^d données par les relations (3.41)-(3.44) et des marges de stabilité du sous-système H_2 donnée par la relation (3.54), une première stratégie d'adaptation de K_v peut être proposée en prenant

$$K_v = \mu \hat{K}_{s,c}^e \quad (3.55)$$

où μ est un paramètre constant supérieur à 1. En appliquant cette stratégie, les performances du schéma de télé-opération deviennent

$$\begin{cases} Z_t = K_{hp} + \alpha K_s \\ \alpha = \alpha^d = \frac{\mu}{1 + \mu} \beta_f \beta_p \\ M_\varphi(H_1) = -\frac{180}{\pi} (\arctan(\frac{2\sqrt{\mu-1}}{2-\mu}) - T_d \sqrt{\mu^{-1}-1}) + 180^\circ \\ M_G(H_1) = -20 \log_{10}(\mu) + 32.8408 \text{ [dB]} \end{cases} \quad (3.56)$$

Un choix adéquat de μ permet alors de fixer une transparence désirée et des marges de stabilité confortables quelque soit l'environnement distant.

L'expérience de télé-opération présentée au §3.2.4 a été reprise dans les mêmes conditions expérimentales mais avec la stratégie d'adaptation de K_v donnée par la relation (3.55). Pour fixer des marges de gain et de phase respectivement données par $M_G(H_1) = 30 \text{ [dB]}$ et $M_\varphi(H_1) = 122 \text{ [deg]}$ (retard maximal admissible dans H égal à 0.2893 [s]) quelque soit la raideur K_s de l'environnement, le paramètre μ a été fixé empiriquement à $\mu = 1.3$. L'impédance désirée Z_t^d et transmise Z_t sont alors égales et définies selon la relation (3.43) dans laquelle $\alpha = \alpha^d = 0.11$. Afin d'assurer les performances de télé-opération en espace libre et de prendre en compte les limitations de l'interface haptique (comme la raideur et l'effort maximal qu'elle peut fournir), la raideur virtuelle K_v est limitée par une valeur minimale $K_{v_{min}} = 1000 \text{ [N/m]}$ et maximale $K_{v_{max}} = 5000 \text{ [N/m]}$.

Les résultats de télé-opération sont donnés sur la Figure 3.12. Comparés aux résultats obtenus au §3.2.4 Figure 3.4(c), dès l'application d'un effort sur un objet de rigidité élevée (livre), la position du bras **PHANTOM** ne varie plus (Figure 3.12(b)). Les sensations perçues par l'opérateur représentent alors réellement l'interaction avec l'environnement considéré. La transparence du schéma de télé-opération est ainsi assurée par l'évolution de la raideur virtuelle illustrée sur la Figure 3.12(c).

Bien que l'adaptation de la raideur K_v selon la relation (3.55) permette d'améliorer la transparence du schéma de télé-opération, elle présente cependant un problème au départ du contact avec l'environnement. En effet, lors du contact avec la balle, la raideur virtuelle K_v présente une oscillation due au régime transitoire de la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ (Figure 3.12(c) à $t \approx 145 \text{ [s]}$). Cette oscillation, non représentative de l'environnement, est perçue par l'opérateur. L'adaptation de la raideur virtuelle K_v doit alors se réaliser en fonction de $\hat{K}_{s,c}^e$ mais avec une dynamique moins élevée. Nous proposons alors d'utiliser une loi d'adaptation formée de quatre fonctions sigmoïdes et donnée par

$$\begin{aligned} K_v = K_{v_{min}} &+ 1000\sigma(\hat{K}_{s,c}^e, a, K_{s,1}) - 1000\sigma(K_{s_{min}}^e, a, K_{s,1}) \\ &+ 1500\sigma(\hat{K}_{s,c}^e, a, K_{s,2}) + 1500\sigma(\hat{K}_{s,c}^e, a, K_{s,3}) \end{aligned} \quad (3.57)$$

où

$$\sigma(x, a, x_0) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-x_0)}}, \quad (3.58)$$

$$a = 0.04, \quad K_{s,1} = 500 \text{ [N/m]}, \quad K_{s,2} = 1500 \text{ [N/m]} \quad \text{et} \quad K_{s,3} = 2200 \text{ [N/m]}. \quad (3.59)$$

L'évolution de la raideur virtuelle K_v selon la relation (3.57)-(3.59) est donnée sur la Figure 3.13 dans laquelle l'environnement a été divisée en trois catégorie selon la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ (mou, rigide très rigide). Pour chacune de ces catégorie, la raideur virtuelle K_v est constante. Les fonctions sigmoïdes permettent la transition entre chacune des catégorie tout en assurant la continuité de la fonction.

3.3. Transparence et stabilité du schéma de télé-opération

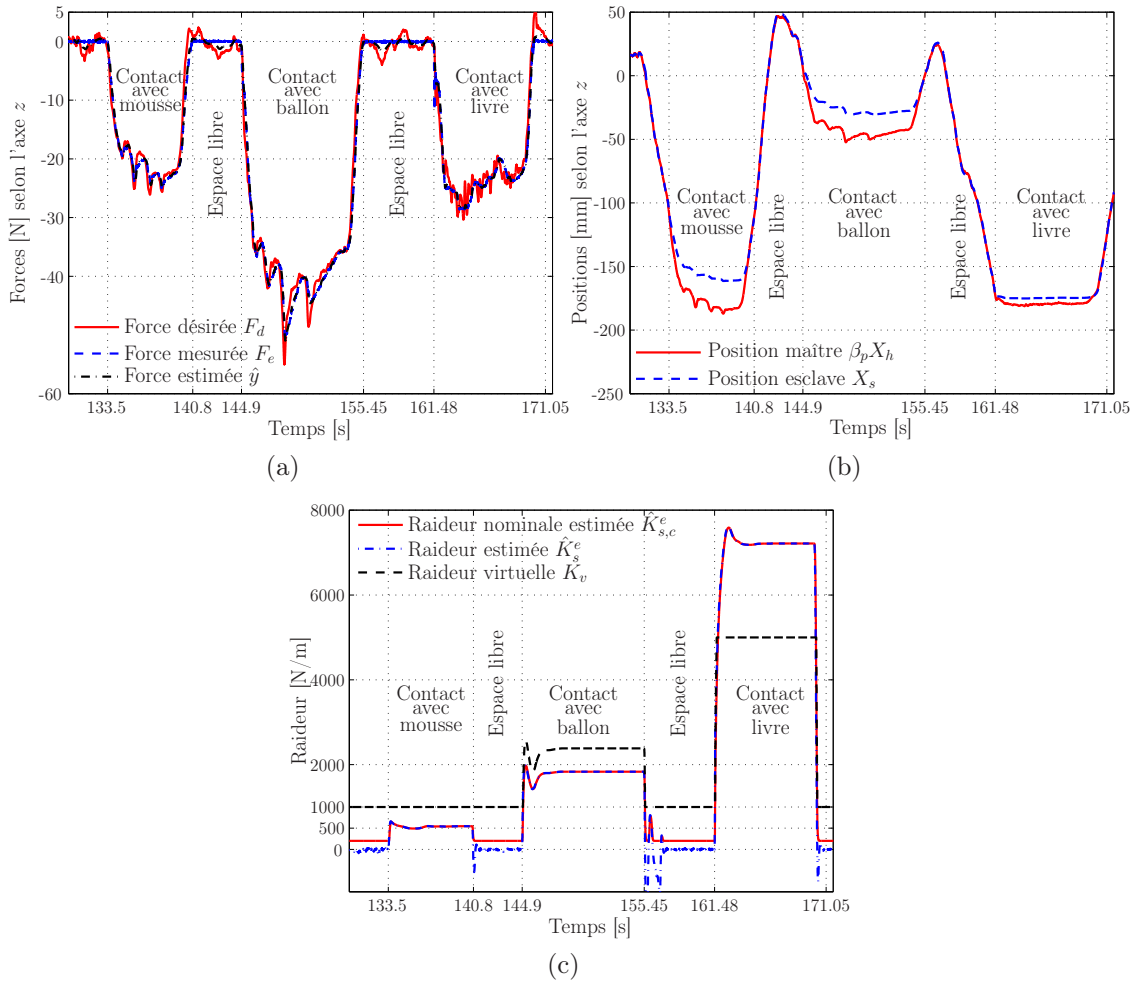


Figure 3.12 - Efforts, positions et raideurs lors d'une télé-opération avec une estimation en ligne de la raideur K_s de l'environnement et adaptation de la raideur virtuelle K_v selon une loi linéaire en fonction de la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$: (a) efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}$ et désiré F_d , (b) suivi de trajectoire et (c) raideurs estimée $\hat{K}_s^e$, nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ et virtuelle K_v . Résultats donnés suivant la direction z de R_0 .

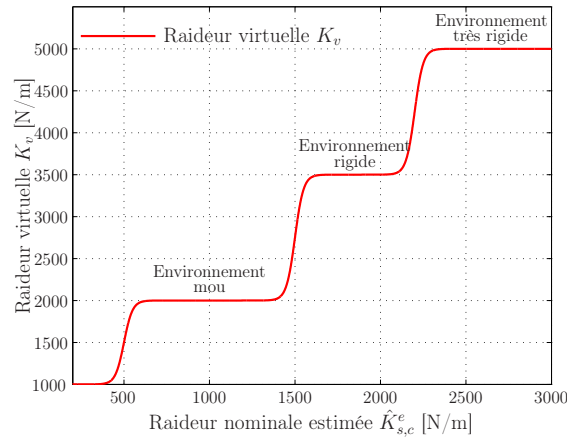


Figure 3.13 - Evolution de la raideur virtuelle K_v en fonction de la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$.

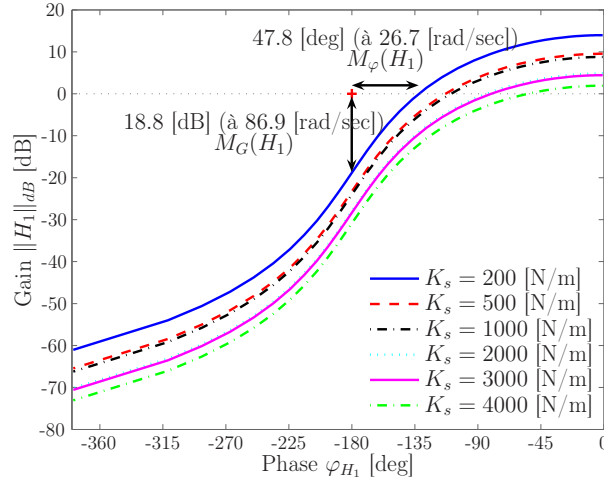


Figure 3.14 - Réponse fréquentielle dans le plan de Black illustrant les marges de stabilité du système reliant la position volontaire de l'opérateur à celle du robot esclave pour différentes valeurs de la raideur de l'environnement et en réalisant une adaptation de la raideur virtuelle K_v selon une loi sigmoïde en fonction de la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$.

Le lieu de transfert dans le plan de Black du schéma de télé-opération considérant la nouvelle loi d'adaptation de la raideur virtuelle K_v (3.57)-(3.59) et pour différentes valeurs de K_s , est illustré sur la Figure 3.14. Cette stratégie d'adaptation assure des marges de stabilité confortables quelle que soit la raideur K_s de l'environnement distant.

De même, la transparence du schéma de télé-opération est donnée sur la Figure 3.15 où la réponse fréquentielle de l'impédance Z_t transmise à l'opérateur est comparée à celle désirée Z_t^d . Cette dernière a été définie selon le paramètre $\alpha^d = \beta_f \beta_p$. Par rapport à la Figure 3.8 et pour une raideur $K_s \leq 3000$ [N/m], Z_t reste dans la bande à $Z_t^d \pm 3$ [dB]. La transparence du schéma de télé-opération est alors garantie. Au delà de 3000 [N/m], l'impédance transmise n'est plus dans la bande à $Z_t^d \pm 3$ [dB]. Ceci est essentiellement dû à la valeur maximale $K_{v_{max}}$ imposée par les limitations de l'interface haptique. Cependant, même si l'impédance désirée Z_t^d n'est plus atteinte, celle transmise à l'opérateur représente toujours un environnement rigide. Elle peut alors être considérée comme acceptable.

Enfin, la télé-opération et l'interaction avec l'environnement distant a été reprise en considérant la loi d'adaptation de la raideur virtuelle K_v donnée par les relations (3.57)-(3.59). Les résultats obtenus et présentés sur la Figure 3.16 montrent les performances en terme de stabilité et de transparence de la stratégie d'estimation et de la commande adaptative. Grâce à l'estimation en ligne de la raideur $\hat{K}_{s,k}^e$ de l'environnement et l'adaptation de la raideur virtuelle K_v (Figure 3.16(c)), l'opérateur est capable de distinguer un environnement de rigidité faible, élevée ou encore très élevée. Lorsque le robot esclave est en contact avec un objet rigide (livre), l'opérateur exerce un effort (Figure 3.16(a)) sans que la position de sa main ne varie (Figure 3.16(b)). Ce comportement traduit les performances en terme de transparence du schéma de télé-opération.

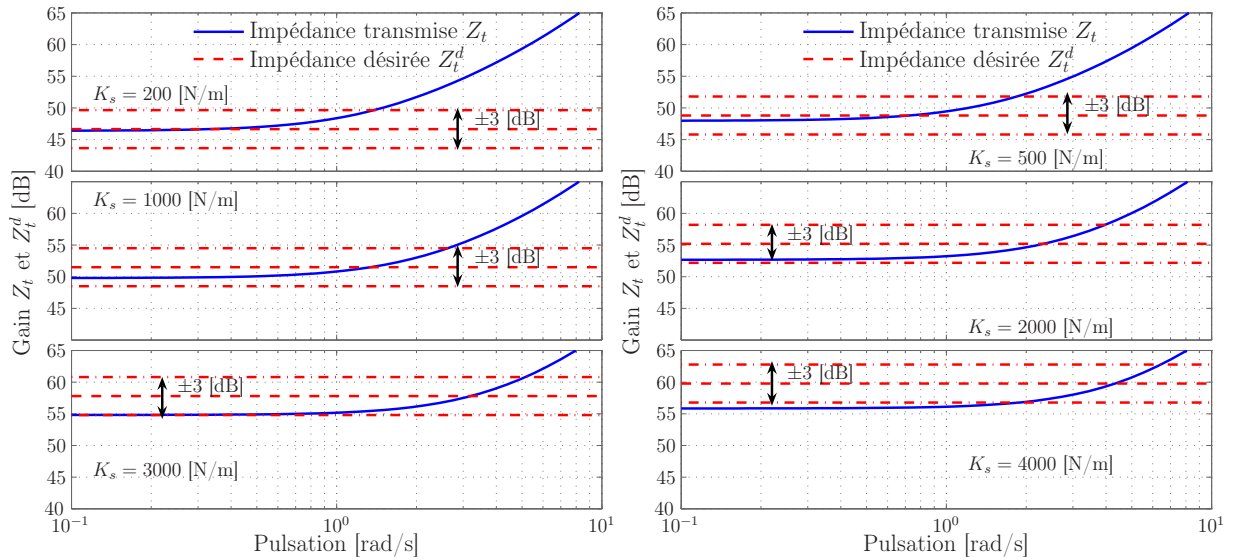


Figure 3.15 - Réponse fréquentielle de l'impédance Z_t transmise à l'opérateur comparée à celle désirée Z_t^d (avec $\alpha^d = \beta_f \beta_p$) pour différentes valeurs de la raideur K_s de l'environnement et pour une adaptation de la raideur K_v selon une loi sigmoïde en fonction de la raideur nominale estimée $K_{s,c}^e$. La bande à $Z_t^d \pm 3$ [dB] est illustrée.

3.4 Télé-opération et interaction avec des tissus *ex-vivo*

Après cette première série d'expérimentation qui a permis de mettre en évidence les performances du schéma de télé-opération, nous nous intéressons maintenant à des interactions avec des tissus *ex-vivo*. Nous avons considéré deux expérimentations. La première est une interaction simple avec des tissus de rigidité différente. La deuxième s'intéresse au geste d'insertion d'aiguille dans un tissu *ex-vivo*. Au cours de ce type d'application, des variations brusques et de grande amplitude peuvent apparaître dans les efforts appliqués lors de la pénétration par exemple. Les résultats obtenus illustreront la qualité de la transparence et la robustesse du schéma de télé-opération.

3.4.1 Interaction avec des tissus *ex-vivo*

Les tissus *ex-vivo* que nous avons considérés sont illustrés sur la Figure 3.17(a) et (b). Ces tissus présentent des éléments mous (un muscle) et rigides (un os). Nous avons effectué une première télé-opération où seule la stratégie de commande en effort a été considérée (sans estimation de la raideur K_s ni adaptation de la raideur virtuelle K_v). Le réglage des paramètres de télé-opération et de commande sont les mêmes que ceux utilisés dans le chapitre précédent (Chapitre 2, §2.4.2). Ils sont donnés dans le Tableau 2.1 et par la relation (2.75). Les résultats obtenus lors de cette première expérimentation sont présentés sur la Figure 3.18. Ils montrent clairement que l'interaction avec un os n'est pas possible. Le système devient instable puisque la commande en effort a été réglée pour des interactions avec un environnement de faible rigidité.

Dans un deuxième temps, pour garantir la stabilité et la transparence du schéma de télé-opération, la stratégie d'estimation de raideur K_s de l'environnement ainsi que celle d'adaptation de la raideur virtuelle K_v ont été considérées. Les paramètres d'estimation de

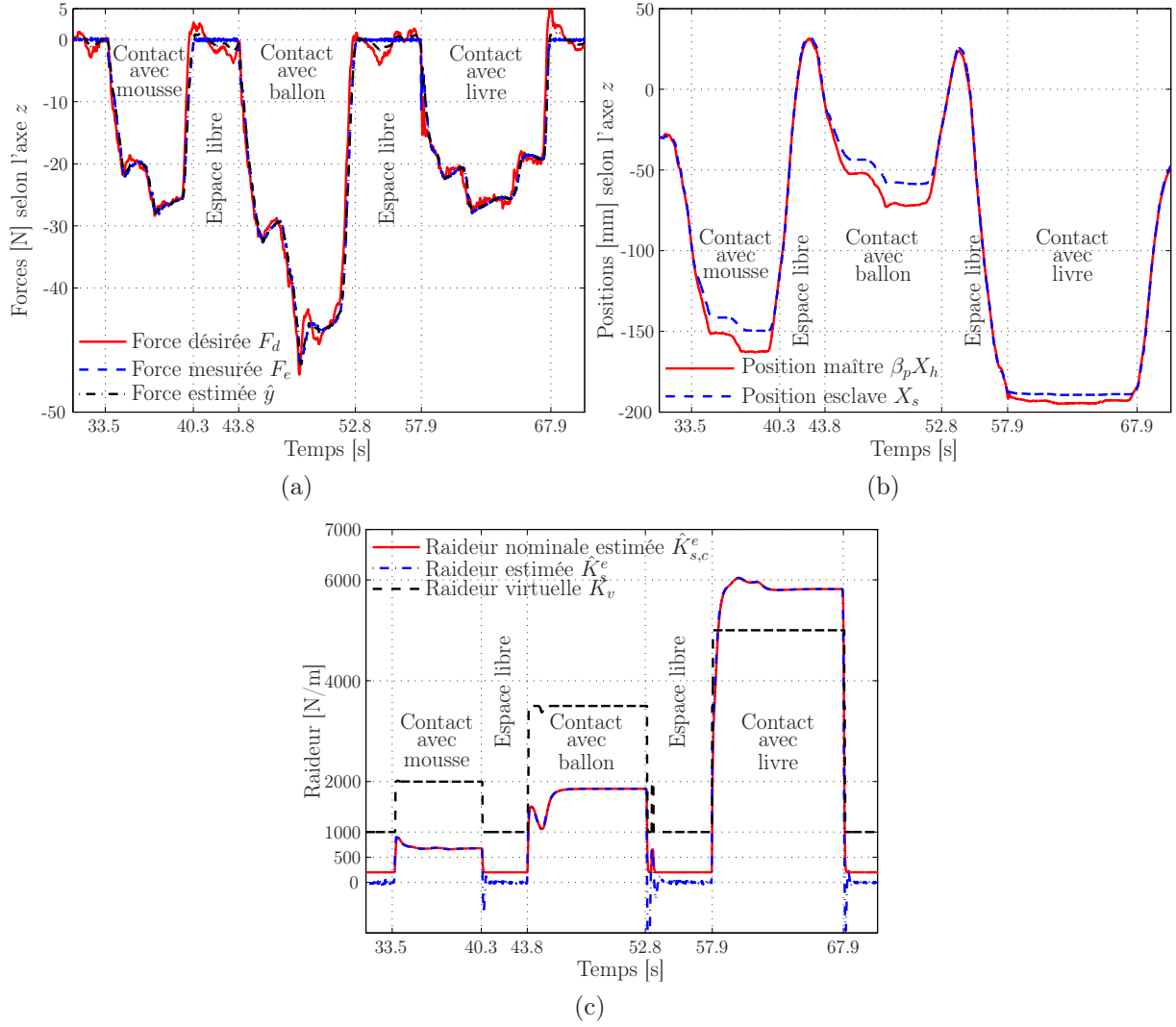


Figure 3.16 - Efforts, positions et raideurs lors d'une télé-opération avec une estimation en ligne de la raideur K_s de l'environnement et adaptation de la raideur virtuelle K_v selon une loi sigmoïde en fonction de la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$: (a) efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}$ et désiré F_d ($-\beta_f F_d$ représente l'effort ressenti par l'opérateur), (b) suivi de trajectoire et (c) raideurs estimée $\hat{K}_s^e$, nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ et virtuelle K_v . Résultats suivant la direction z de R_0 .

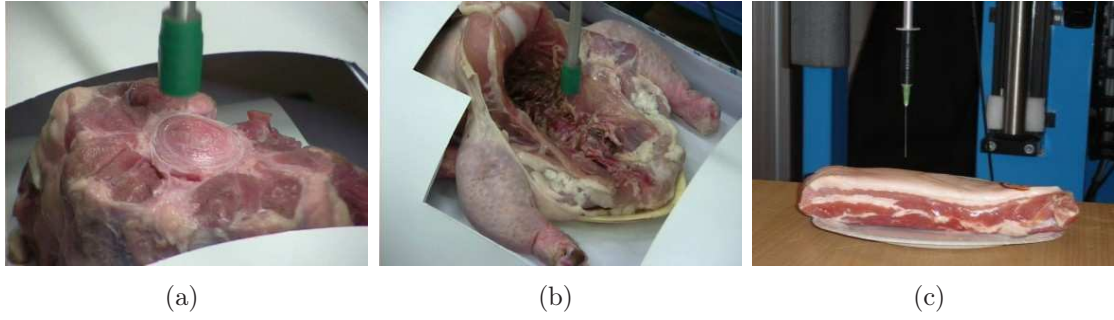


Figure 3.17 - Environnement composé de tissus *ex-vivo* : (a) et (b) tissus *ex-vivo* présentant des éléments mous (muscle) et rigide (os) et (c) tissus *ex-vivo* pour la télé-opération et l'insertion d'une aiguille fixée au niveau de l'effecteur du robot esclave.

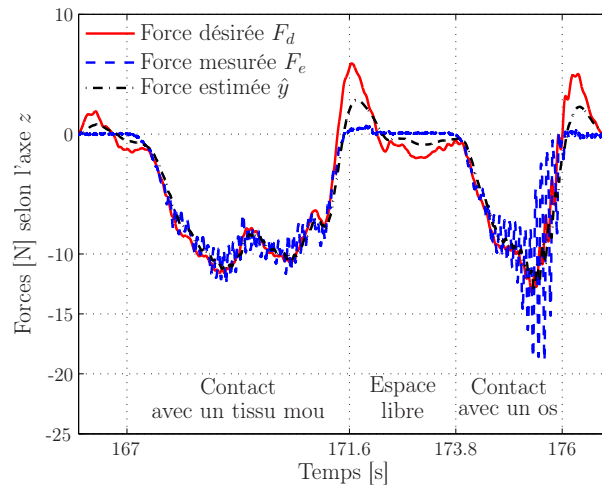


Figure 3.18 - Télé-opération et prise de contact avec un tissu *ex-vivo* sans une estimation en ligne de la raideur de l'environnement : efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}$ et désiré F_d suivant l'axe z de R_0 ($-\beta_f F_d$ représente l'effort ressenti par l'opérateur).

la raideur sont identiques à ceux utilisés dans le §3.2.4. Ils sont donnés par le Tableau 3.1. La loi d'adaptation de la raideur virtuelle K_v est donnée par les relations (3.57)-(3.59)

Les résultats sont illustrés sur la Figure 3.19. Grâce à la stratégie d'estimation en ligne de la raideur du tissu *ex-vivo*, des interactions avec un os ont pu être réalisées et la stabilité du schéma de télé-opération a été assurée. La position du bras maître **PHANTOM** tout au long du contact avec un os, montre que les sensations perçues par l'opérateur représentent une interaction avec un environnement rigide. La transparence du schéma de télé-opération a été garantie par l'adaptation de la raideur virtuelle K_v selon la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$. Il est cependant important de préciser que les faibles oscillations enregistrées au niveaux des efforts désirés F_d sont filtrées par le système de télé-opération et ne sont pas perçues par l'opérateur.

Ces résultats ont fait l'objet d'une publication à CDC'07 [Zarrad *et al.*, 2007c].

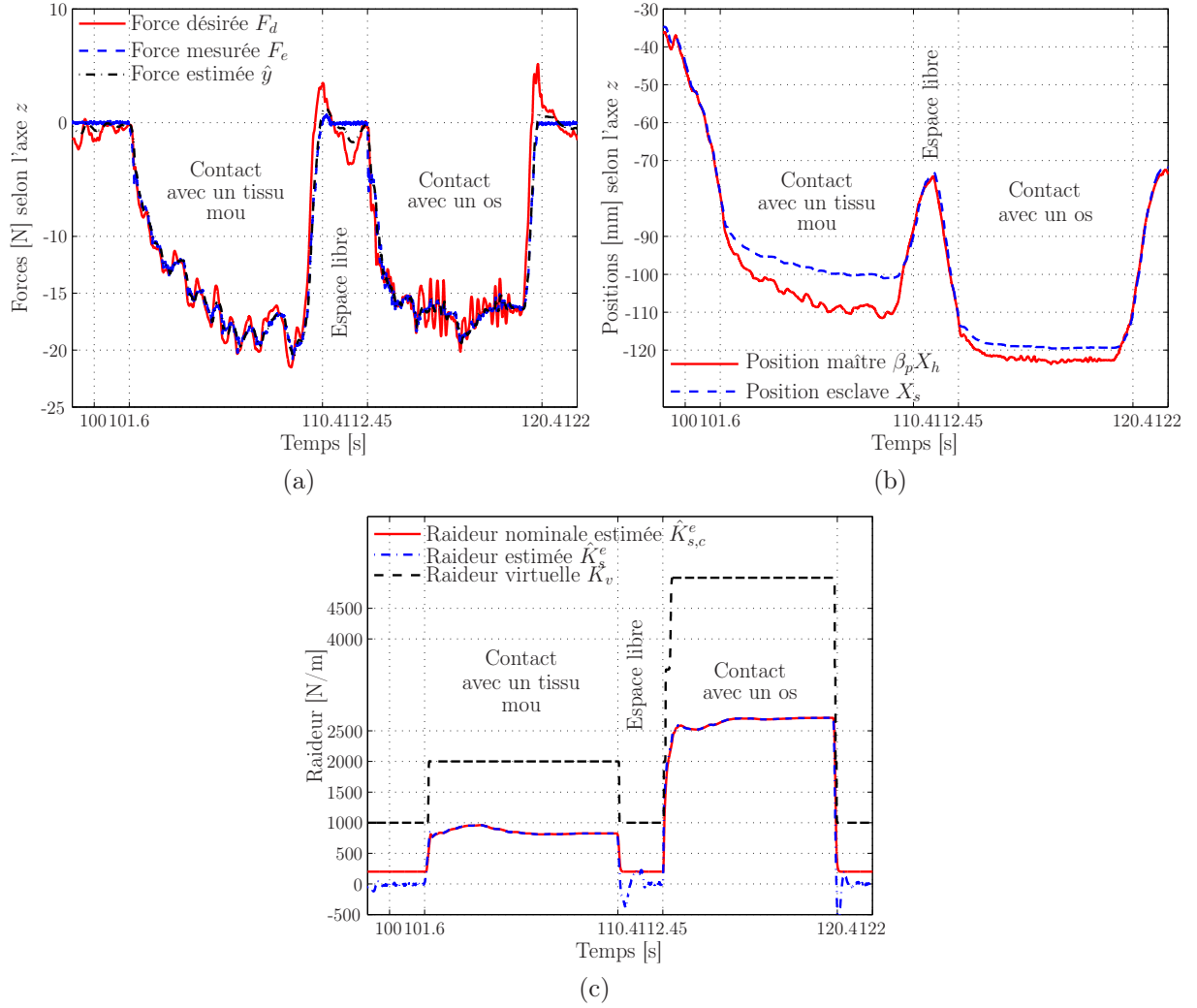


Figure 3.19 - Efforts, positions et raideurs lors d'une télé-opération et interaction avec des tissus ex-vivo de rigidité différente avec estimation en ligne de la raideur K_s de l'environnement et adaptation de la raideur virtuelle K_v selon une loi sigmoïde en fonction de la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$: (a) efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}$ et désiré F_d ($-\beta_f F_d$ représente l'effort ressenti par l'opérateur), (b) suivi de trajectoire et (c) raideurs estimée $\hat{K}_s^e$, nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ et virtuelle K_v . Résultats suivant la direction z de R_0 .

3.4.2 Insertion d'aiguille télé-opérée

Afin d'effectuer une insertion d'aiguille télé-opérée, une aiguille chirurgicale a été rigide-ment montée au niveau de l'organe terminal du robot **D2M2**. L'aiguille considérée est de longueur 50 [mm] et de diamètre 0.8 [mm]. L'environnement, illustré sur la Figure 3.17(c), est un tissu *ex-vivo* formé d'un muscle et de peau. La raideur K_s du tissu, est essentiellement égale à celle de la peau. Avant de présenter les résultats de télé-opération obtenus, nous présentons le geste d'insertion d'aiguille ainsi que les efforts qui sont considérés.

Etude du geste

Lors d'une interaction avec un tissu, nous supposons que la position X_s du robot est égale à celle du tissu. Comme le montre la Figure 3.20, l'insertion d'une aiguille dans un tissu peut se réaliser en quatre étapes dans lesquelles la position de l'aiguille (du robot) et celle du tissu peuvent être différentes. Les efforts appliqués lors de ces phases deviennent alors différents de ceux appliqués au cours d'une interaction classique avec un environnement :

- Phase d'initialisation : l'aiguille attachée au robot est considérée au contact du tissu. Sa position et l'effort qu'elle applique sont respectivement donnés par $X_s = X_{s_0}$ et $F_e = 0$.
- Phase d'appui : tout au long de cette phase, l'aiguille applique un effort $F_e = F_{e1}$ sur le tissu afin de réaliser l'insertion.
- Phase d'insertion et de relaxation : au début de cette phase, la position de l'aiguille et celle du tissu sont égales à $X_{s,pénétration}$. La pénétration a lieu à $t = t_{pénétration}$ dès que l'effort appliqué F_e atteint une valeur donnée qui dépend de la vitesse de déplacement de l'aiguille [Heverly *et al.*, 2005]. À cet instant et par son élasticité, le tissu se déplace vers la position initiale X_{s_0} sans jamais l'atteindre. Pendant l'insertion, par frottement avec le tissu, l'aiguille l'attire dans le sens de son déplacement. Une fois arrivée à la zone d'intérêt, le tissu revient vers la position initiale X_{s_0} pour atteindre X_{relax} tel que $X_{s_0} < X_{relax} < X_{s,pénétration}$. Tout au long de cette phase, la position de l'aiguille et celle du tissu ne sont pas égales. Les efforts appliqués $F_e = F_{e2}$ sont essentiellement dus aux propriétés physiques du tissu et à l'effort de frottement avec l'aiguille.
- Phase d'extraction : de même que lors de l'insertion, l'extraction de l'aiguille attire le tissu dans le sens de son déplacement jusqu'à atteindre une position $X_{s,extract}$. Les efforts $F_e = F_{e3}$ appliqués sont aussi dus au frottement entre le tissu et l'aiguille.

Okamura et Simone [Okamura *et al.*, 2004] identifient les efforts appliqués lors d'un geste d'insertion d'une aiguille dans un foie comme étant la somme de trois efforts distincts. Avant la pénétration du tissu, les efforts $F_e = F_{e1}$ sont dus à l'interaction avec le tissu et donc à sa raideur. Ceux appliqués après sont la somme des efforts de frottement et des efforts appliqués par l'aiguille pour réaliser le perçage du tissu. Considérant que ces derniers efforts sont difficiles à identifier, Maurin *et al* [Maurin *et al.*, 2004a] comparent deux modèles pour caractériser les efforts appliqués. Chacun des modèles comporte une composante de raideur et une de frottement. Pour améliorer les résultats obtenus, Yang *et al* [Yang *et al.*, 2005] proposent de rajouter au modèle une composante propre aux caractéristiques physiques du foie. Barbé *et al* [Barbé *et al.*, 2007b] considèrent que les efforts appliqués lors de l'insertion de l'aiguille dans un tissu peuvent être modélisés par un système ressort-amortisseur. Ils réalisent alors une identification en ligne du modèle linéaire

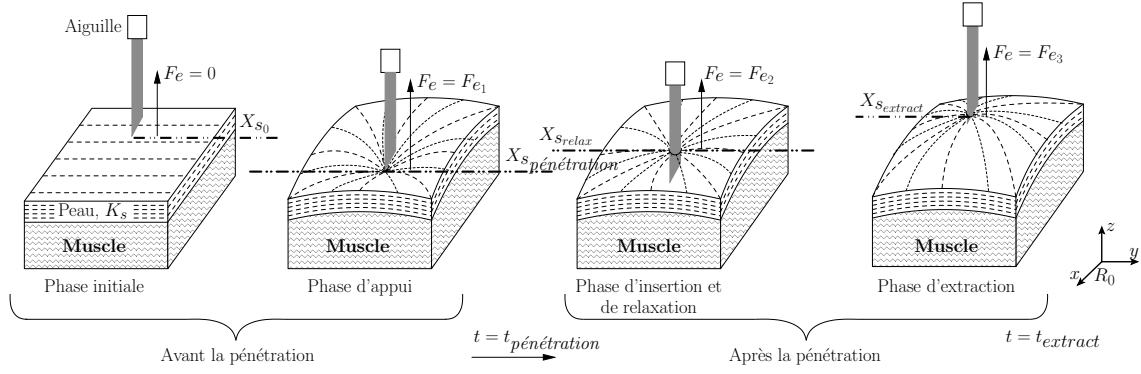


Figure 3.20 - Les différentes phases d'insertion d'une aiguille dans un tissu ex-vivo.

Kelvin-Voigt donné par la relation (3.1) et du modèle non linéaire Hunt-Crossley [Diolaiti *et al.*, 2005a]. Les résultats obtenus montrent que les efforts peuvent être représentés par le modèle linéaire de Kelvin-Voigt. En considérant une faible vitesse de déplacement de l'aiguille, nous supposons que seule la raideur K_s du tissu intervient dans la représentation des efforts appliqués. Ceci correspond alors à la stratégie de commande en effort et d'estimation de la raideur présentée dans le Chapitre 2 et le §3.2.

Analyse expérimentale

Nous avons réalisé la télé-opération et l'insertion de l'aiguille dans le tissu de la Figure 3.17(c) en considérant le schéma de télé-opération et les mêmes paramètres de commande que ceux utilisés précédemment (Tableau 2.1 et relation (2.75)). Dans un premier temps, nous n'utilisons pas la stratégie d'estimation de la raideur du tissu. La Figure 3.21(a) montre les efforts appliqués pendant l'expérience. Étant donné que le tissu est mou, la phase d'appui se réalise avec succès et le système reste stable. À l'instant $t = t_{pénétration}$, la pénétration du tissu s'effectue et une brusque variation de la position X_s du robot (et donc de l'aiguille) apparaît (voir Figure 3.21(b)). Un dépassement de la position désirée par l'opérateur peut être remarqué montrant que ce dernier n'est plus capable de contrôler le robot distant. Comme le schéma de télé-opération est de type position - position, ce brusque déplacement de l'aiguille provoque une grande variation des efforts désirés F_d . Ces derniers, ressentis par l'opérateur, deviennent différents des efforts F_e appliqués par le robot. La transparence du schéma de télé-opération n'est alors plus garantie et l'action involontaire provoquée par le retour d'effort semble dominer celle désirée par l'opérateur qui ne peut plus contrôler la position de l'aiguille pendant et après la pénétration du tissu.

Une deuxième expérimentation est réalisée en considérant la stratégie d'estimation de la raideur K_s du tissu. Les paramètres d'estimation sont ceux utilisés précédemment et donnés dans le Tableau 3.1. Pour augmenter la transparence du schéma de télé-opération, l'adaptation de la raideur virtuelle K_v est également utilisée (relations (3.57) et (3.58)). Les résultats obtenus sont donnés sur la Figure 3.22. Dès le début de la phase d'appui, la raideur du tissu est estimée et une adaptation de la commande en effort ainsi que de la raideur virtuelle K_v est réalisée (voir Figure 3.22 (c)). Les interactions entre l'aiguille et le tissu sont alors mieux perçues par l'opérateur. Ce dernier est capable de caractériser le tissu et d'anticiper la pénétration. À l'instant $t = t_{pénétration}$, contrairement à l'expérience précédente et malgré une brusque variation des efforts appliqués F_e , ces derniers restent très proches des efforts $\hat{y}$ et F_d respectivement estimés par la stratégie de commande et

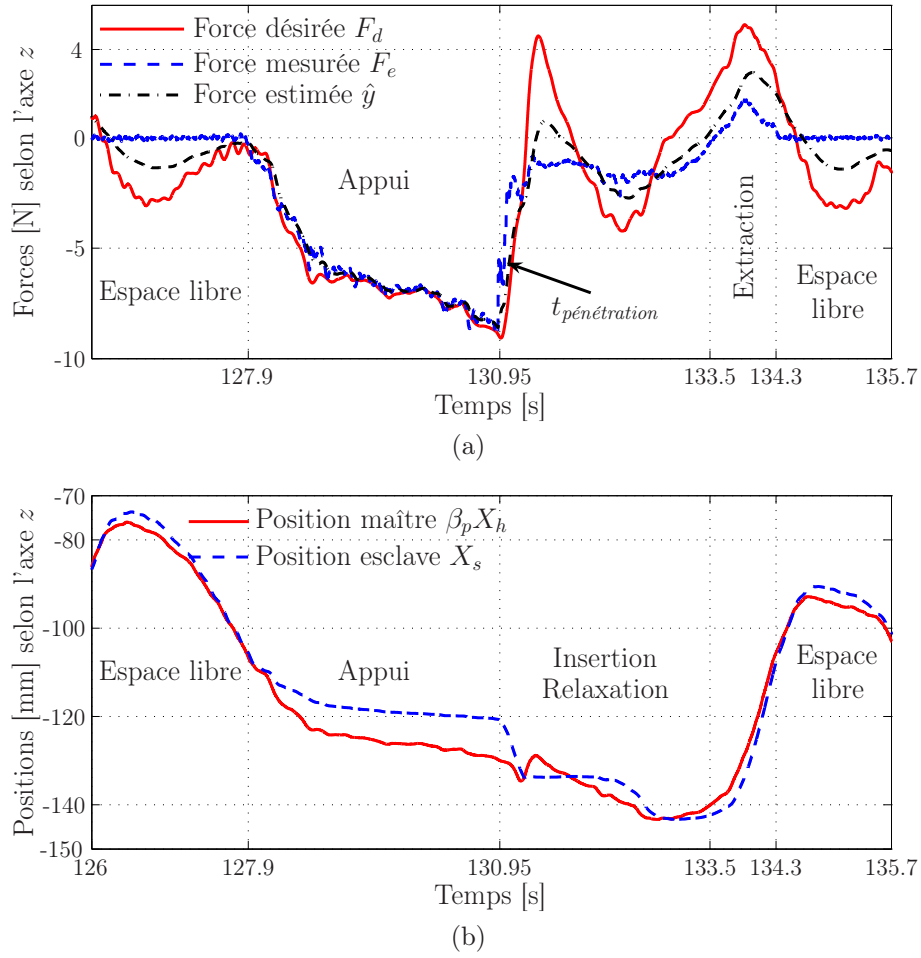


Figure 3.21 - Télé-opération et insertion d'une aiguille dans un tissu *ex-vivo* suivant l'axe z de R_0 sans considérer la stratégie d'estimation en ligne de la raideur du tissu : (a) efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}$ et désiré F_d et (b) suivi de trajectoire.

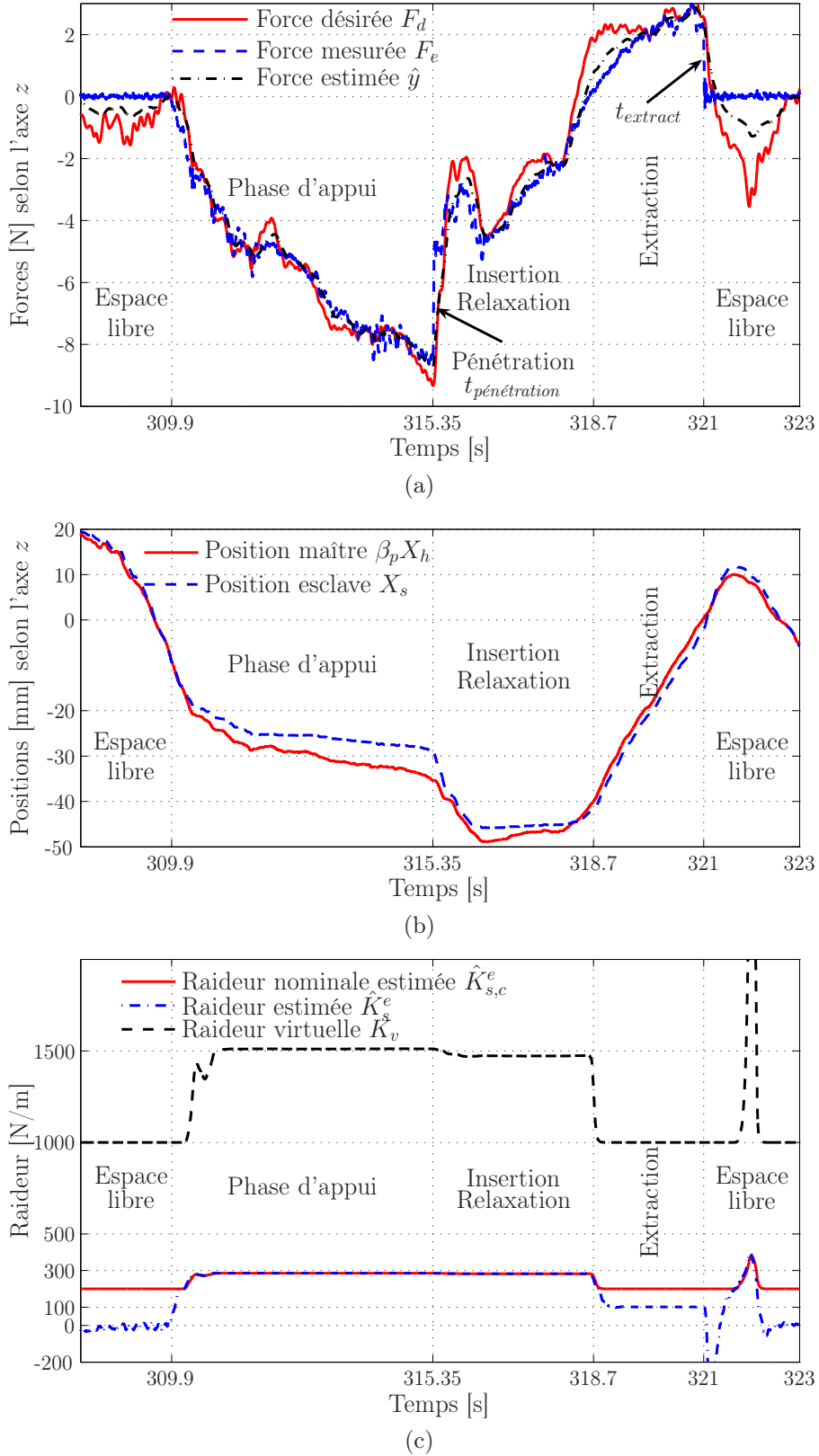


Figure 3.22 - Télé-opération et insertion d'une aiguille dans un tissu ex-vivo suivant l'axe z de R_0 avec une estimation en ligne de la raideur du tissu et adaptation de la raideur virtuelle K_v en fonction de la raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$: (a) efforts mesuré F_e , estimé $\hat{y}$ et désiré F_d ($-\beta_f F_d$ représente l'effort ressenti par l'opérateur), (b) suivi de trajectoire suivant la direction z et (c) raideurs estimée $\hat{K}_s^e$, nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ et virtuelle K_v .

ressentis par l'opérateur. Ce dernier contrôle parfaitement l'évolution de l'aiguille et perçoit les interactions entre l'aiguille et le tissu. Il continue alors l'insertion de l'aiguille avant de réaliser son extraction. Tout au long de cette dernière phase où les efforts appliqués sont dus au frottement entre l'aiguille et le tissu, la stratégie d'estimation de la raideur identifie un paramètre $\hat{K}_s^e = 100$ [N/m]. Ce paramètre n'est pas pris en compte puisque la raideur nominale estimée $K_{s,c}^e$ est bornée par sa valeur minimale $K_{s,min}^e = 200$ [N/m] (voir Tableau 3.1). Ceci n'a pas d'influence importante sur la phase d'extraction puisque elle se réalise avec succès malgré la brusque variation des efforts appliqués à $t = t_{extract}$. Il est important de noter que les pics de la raideur nominale $K_{s,c}^e$ et virtuelle K_v observés à l'instant $t \approx 322$ [s] sont très brefs et n'ont aucun effet sur le comportement du système. D'après la Figure 3.22(b), la télé-opération dans un espace libre s'est réalisée dans des conditions stables.

Ces résultats ont fait l'objet d'une publication à IROS'07 [Zarrad *et al.*, 2007d].

3.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une estimation en ligne de la raideur de l'environnement et une analyse de stabilité et de transparence du schéma de télé-opération avec retour d'effort. Une adaptation de la loi de commande en fonction de la raideur estimée a permis d'accroître les performances du système. Les stratégies proposées ont été validées par une télé-opération et une interaction avec des tissus *ex-vivo*.

Pour réaliser l'estimation de la raideur de l'environnement, nous avons utilisé un filtre de Kalman étendu établi à partir de la représentation d'état du système esclave. Cette représentation présente l'avantage de ne pas considérer la position de repos de l'environnement qui, dans le cadre de la chirurgie mini-invasive, dépend de la position de l'organe et de son mouvement. Le filtre de Kalman a ensuite été écrit sous une forme faisant apparaître, distinctement, les erreurs d'estimation de la raideur de l'environnement et celles de la modélisation du robot esclave. La contribution majeure du travail présenté a été l'intégration des erreurs de modélisation du robot dans la phase de prédiction de la raideur de l'environnement. Une adaptation en ligne de la loi de commande en fonction de la raideur estimée a ensuite permis une télé-opération et une interaction avec un environnement de rigidité différente et élevée.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la transparence et à la stabilité du schéma de télé-opération. Nous avons alors déterminé l'impédance transmise et ressentie par l'opérateur au niveau de l'interface haptique. Elle dépend non seulement des caractéristiques de l'environnement mais aussi des paramètres de télé-opération. Quant à la stabilité du système, elle a été établie en faisant la distinction entre l'action volontaire et involontaire de l'opérateur qui télé-opère le robot esclave. Une loi d'adaptation des paramètres de télé-opération en fonction de la raideur estimée a finalement été proposée. Elle a été établie selon un compromis imposant une impédance désirée et ressentie par l'opérateur tout en assurant des marges de stabilité satisfaisantes. Une évaluation expérimentale a montré que l'opérateur était capable de distinguer des éléments de rigidité différentes faisant partie d'un environnement distant.

L'évaluation expérimentale de l'ensemble du schéma de télé-opération a été établie en considérant des interactions avec des tissus *ex-vivo*. Les premiers résultats, obtenus à la suite d'une interaction simple avec des tissus présentant des éléments mous et rigides, ont montré l'efficacité de la stratégie d'estimation de la raideur et de la commande adaptative. Les deuxièmes résultats ont été obtenus lors d'une insertion d'aiguille télé-opérée dans un

tissus *ex-vivo* mou. Ce geste d'insertion, fréquent en imagerie interventionnelle, met en évidence des variations brusques et importantes des efforts appliqués. Grâce à l'adaptation des paramètres de télé-opération, l'opérateur a eu une meilleure perception des interactions entre l'aiguille et le tissu. Ce qui lui a permis de contrôler les efforts appliqués et de maîtriser l'insertion de l'aiguille dans le tissu.

Chapitre 4

Vers la chirurgie mini-invasive à cœur battant

Sommaire

4.1	Introduction	91
4.2	Chirurgie mini-invasive et passage par le trocart	92
4.2.1	Les solutions existantes	92
4.2.2	Commande par découplage dynamique	94
4.2.3	Analyse expérimentale	100
4.3	Vers la compensation des mouvements physiologiques	107
4.3.1	Assistance en chirurgie cardiaque	107
4.3.2	La commande en effort et le rejet de perturbations périodiques	108
4.3.3	Rejet de perturbations périodiques en effort	109
4.3.4	Analyses expérimentales	114
4.4	Conclusion	116

4.1 Introduction

Parmi les difficultés liées à la chirurgie mini-invasive et définies au §1.1.1.2, deux contraintes fortes sont à prendre en compte : la première concerne la perte de mobilité lors du passage de l'instrument par le trocart, la deuxième est liée aux mouvements physiologiques des organes et en particulier du cœur. Dans ce chapitre, nous proposons ainsi deux solutions pour répondre à ces contraintes.

Le passage des instruments par le trocart bloque leurs déplacements le long du plan tangent à la peau du patient. Leur manipulation se réalise alors autour d'un point fixe défini par la position du trocart à la surface du corps. Cette contrainte doit être prise en compte lors de la conception d'un système de télé-opération d'un robot esclave dédié à la chirurgie mini-invasive. Dans la première partie de ce chapitre, nous rappellerons les avantages et inconvénients des principales solutions proposées pour pallier cette contrainte. Nous proposerons ensuite une approche logicielle qui réalise un découplage entre la tâche de télé-opération du robot esclave et sa posture qui lui impose le passage par un point fixe dans l'espace. La stratégie de télé-opération avec retour d'effort reste bien évidemment la même que celle que nous avons proposée, validée et analysée dans les chapitres précédents. Quant à la gestion de la posture, nous imaginons que l'instrument du robot esclave est tenu par un robot virtuel qui lui impose le passage par un point fixe. Nous réalisons alors la commande en position du robot virtuel afin que la position de son organe terminal

coïncide avec celle du trocart. Cette commande en position reprend les techniques de commande par observation et retour d'état développées dans le deuxième chapitre de ce manuscrit. La pertinence de notre approche sera finalement évaluée sur la plate-forme robotique pour une télé-opération en espace libre avec prise en compte du passage par un point fixe.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous reprenons également l'architecture de commande en effort du robot esclave pour proposer une première solution visant à compenser les mouvements physiologiques lors d'une intervention chirurgicale mini-invasive à cœur battant. En effet lors d'une telle intervention, l'utilisation d'un stabilisateur mécanique n'est que partiellement satisfaisante puisque des mouvements résiduels à l'intérieur de la zone stabilisée peuvent être observés [Lemma *et al.*, 2005]. Ces mouvements compliquent le travail du chirurgien qui réalise mentalement leur compensation. Une solution alternative consiste donc à offrir au chirurgien une stabilisation virtuelle du cœur. Nous proposerons alors une stratégie de commande pour synchroniser les mouvements des instruments avec ceux du cœur. Notre approche consiste à compenser les perturbations, dues au mouvement de l'environnement, dans l'effort appliqué par l'instrument. Ces perturbations sont alors estimées et utilisées dans une stratégie de commande référencée modèle capable de les atténuer. Cette dernière se base sur le fait qu'une compensation des perturbations en effort doit produire des perturbations dans la position du robot. Notre approche sera validée sur la plate-forme robotique dans laquelle un deuxième robot exogène (1 axe vertical) est utilisé pour simuler un environnement en mouvement.

4.2 Chirurgie mini-invasive et passage par le trocart

4.2.1 Les solutions existantes

La contrainte du passage par le trocart peut être levée en créant un centre de rotation déporté et situé à la surface du corps du patient. Ce centre de rotation peut être obtenu de manière mécanique lors de la conception du robot ou pris en compte dans la stratégie de commande. Dans les paragraphes suivants, nous présentons quelques solutions mécaniques et logicielles.

4.2.1.1 La cinématique contrainte

Parmi les solutions mécaniques, une première possibilité repose sur l'utilisation d'un poignet à articulations passives comme c'est le cas des robots porte-endoscope **AESOP (Zeus)** [Allaf *et al.*, 1998], **EndoAssist** [Finlay, 1996], **LapMan** [Polet et Donnez, 2004] ou encore les deux plates-formes **RTW** [Çavuşoğlu *et al.*, 2001] et **The Black Falcon** [Madhani *et al.*, 1998]. L'inconvénient majeur de cette solution est le manque de précision dans le positionnement de l'extrémité de l'instrument [Krupa *et al.*, 2002] dû aux déplacements du trocart induits par l'élasticité de la peau du patient. Une deuxième solution mécanique consiste à utiliser des articulations actives avec par exemple une architecture en double pantographe comme c'est le cas du robot **Da Vinci** [Guthart et Salisbury, 2000] ou un système de transmission à base de poulies et de courroies comme les systèmes **ARTEMIS** [Rininsland, 1999] et **PAKY** [Taylor et Stoianovici, 2003]. Leur inconvénient réside dans la mise en correspondance entre la position du trocart et le centre de rotation déporté [Krupa *et al.*, 2002]. Cette mise en correspondance nécessite un placement optimal du robot par rapport au patient. En cas de décalage, des efforts latéraux

importants risquent d'être appliqués sur la peau du patient. L'ensemble de ces solutions mécaniques possède en plus un inconvénient majeur lié à leur encombrement dans la salle d'opération. Pour s'affranchir de cet encombrement, des solutions plus compactes sur la base de poignets sphériques ont été proposées. Citons par exemple le robot télé-opéré **EndoBot** [Kang et Wen, 2001] ou les robots qui s'installent sur le corps du patient comme le robot **MC²E** [Zemiti *et al.*, 2004] et le porte-endoscope **LER** [Berkelman *et al.*, 2003a]. Cette solution qui permet effectivement de gagner de l'espace dans la salle d'opération impose cependant un encombrement accru du site opératoire local.

4.2.1.2 La commande contrainte

Une alternative à la conception des solutions mécaniques est de considérer le passage par le trocart en s'appuyant sur une stratégie de commande dédiée du robot. Dans [Krupa *et al.*, 2002], les auteurs proposent la commande d'un robot porte-endoscope à 6 ddl en minimisant les efforts latéraux appliqués sur le trocart. Ils considèrent que les instruments ne sont pas en contact avec les organes. Cette solution nécessite un capteur d'effort uniquement dédié à la mesure des efforts latéraux. Une autre stratégie, proposée dans [Ortmaier, 2002], réalise une estimation en ligne du centre de rotation déporté. Cette estimation est ensuite intégrée dans la stratégie de commande du robot chirurgical. De la même manière, dans [Michelin *et al.*, 2002], les auteurs proposent de projeter la contrainte du passage par le trocart dans l'espace articulaire d'un robot à 5 ddl (le robot **D2M2**). Néanmoins, ces deux techniques sont dédiées à une commande en position du robot esclave et ne peuvent pas être appliquées à une stratégie de commande en effort.

Dans [Michelin *et al.*, 2004], les auteurs proposent d'utiliser la redondance du robot par rapport à la tâche pour réaliser un découplage dynamique tâche-posture. Cette technique se base sur la réalisation de deux stratégies de commande simultanées. La première, dédiée à la commande de l'effecteur du robot dans l'espace opérationnel, permet la synthèse d'un vecteur de couple $\boldsymbol{\tau}_{sc,t}$ pour la réalisation d'une tâche de télé-opération sans retour d'effort. La deuxième stratégie permet de synthétiser un vecteur de couple $\boldsymbol{\tau}_{sc,n}$ de commande de l'espace contraint imposant le passage de l'instrument par le trocart. Son principe consiste à minimiser la distance $d_{tr}(\mathbf{q})$ entre l'instrument du robot et le trocart est (voir Figure 4.1). Connaissant la position $\mathbf{X}_{tr} = [X_{tr,x} \ X_{tr,y} \ X_{tr,z}]^T$ du trocart dans le repère R_0 et la configuration articulaire du robot, la distance $d_{tr}(\mathbf{q})$ est

$$d_{tr}(\mathbf{q}) = \frac{|(\mathbf{X}_{s-1} - \mathbf{X}_s) \wedge (\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{tr})|}{|\mathbf{X}_{s-1} - \mathbf{X}_s|}, \quad (4.1)$$

où $\wedge$ est le produit vectoriel. $\mathbf{X}_{s-1}$ désigne les coordonnées opérationnelles de l'extrémité de l'instrument fixée sur le robot. Pour minimiser cette distance, les auteurs proposent d'appliquer un couple

$$\boldsymbol{\tau}_{sc,n} = \alpha \nabla d_{tr}, \quad (4.2)$$

où ∇d_{tr} et α sont respectivement le gradient de $d_{tr}(\mathbf{q})$ par rapport à $\mathbf{q}$ et un scalaire négatif (direction inverse du gradient). L'inconvénient de cette commande de l'espace contraint réside dans le fait qu'elle est une commande de type proportionnel peu performante. De plus, elle se base uniquement sur la distance d_{tr} et ne prend pas en compte l'effet du couple $\boldsymbol{\tau}_{sc,t}$ dédié à la tâche. Ces limitations imposent ainsi un compromis entre les performances de la tâche de télé-opération et celles du respect de la contrainte du passage par le trocart [Michelin, 2004].

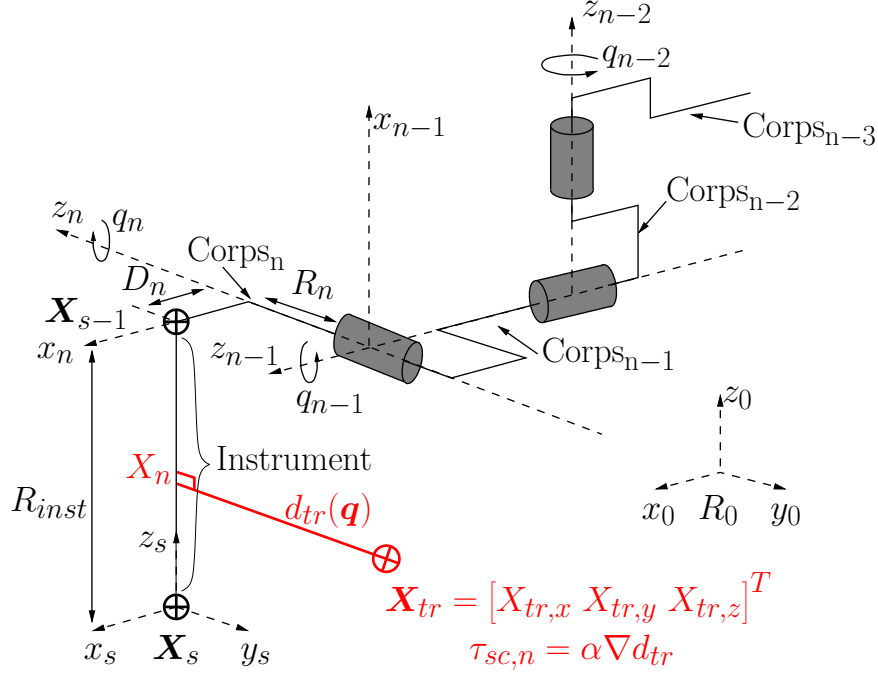


Figure 4.1 - Principe de la commande de l'espace contraint pour le respect du passage par un point fixe [Michelin et al., 2004].

C'est pourquoi nous proposons une nouvelle stratégie toujours basée sur le découplage dynamique tâche-posture et utilisant la technique d'observation et de commande par retour d'état présentée au §2.3.2 du deuxième chapitre pour réaliser la tâche de téléopération avec retour d'effort. Pour la commande de l'espace contraint, nous supposons que l'organe terminal d'un robot virtuel est attaché à l'instrument du robot esclave **D2M2** comme cela est illustré sur le schéma de principe de la Figure 4.2. En réalisant un mouvement, le robot **D2M2** fait déplacer l'organe terminal du robot virtuel (cf. Figure 4.2(a)). Pour respecter le passage par le trocart, nous réalisons la commande du robot virtuel afin que la position de son effecteur soit toujours égale à la position du trocart (cf. Figure 4.2(b)). La stratégie de commande en position sera basée sur un découplage non-linéaire du robot virtuel et sur des techniques d'observation et de commande par retour d'état déjà développées dans les chapitres précédents. L'effet de la tâche de téléopération y sera pris en compte.

4.2.2 Commande par découplage dynamique

4.2.2.1 Découplage Tâche-Posture

Le principe du découplage dynamique tâche-posture qui s'applique à un robot redondant par rapport à la tâche repose sur la décomposition du couple moteur de commande τ_{sc} en deux composantes découplées [Khatib, 1987]

$$\tau_{sc} = \tau_{sc,t} + \tau_{sc,p} \quad (4.3)$$

avec

$$\tau_{sc,p} = (I_{(n \times n)} - J_t^T J_t^{+T}) \tau_{sc,n}, \quad (4.4)$$

où $I_{(n \times n)}$ est la matrice d'identité de dimension $(n \times n)$. J_t et J_t^+ désignent respectivement la matrice jacobienne du robot et sa pseudo-inverse généralisée à droite. $\tau_{sc,t}$ est un couple

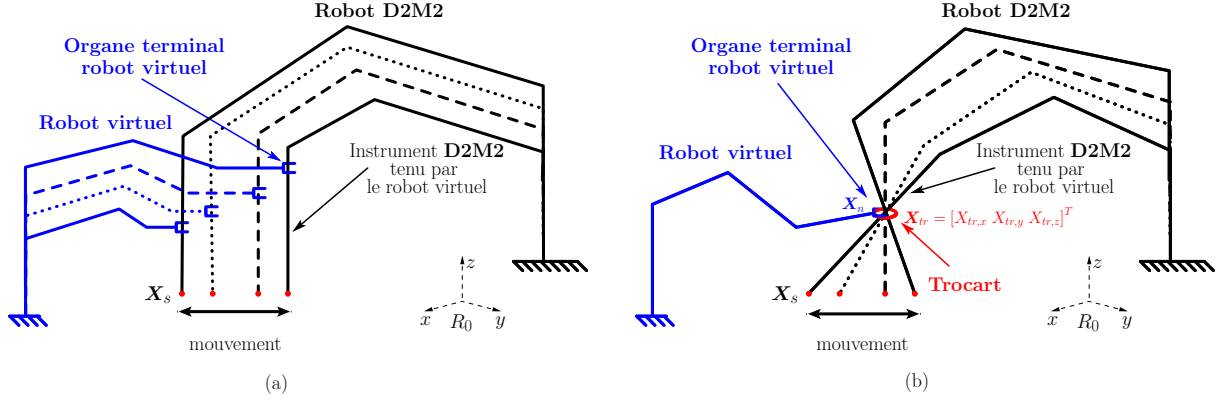


Figure 4.2 - Schéma de principe de la commande de l'espace contraint. Mouvement du robot D2M2 (a) non contraint, (b) contraint par le passage par le trocart.

moteur dédié à la réalisation de la tâche de télé-opération avec retour d'effort. $\tau_{sc,p}$ est un couple qui permet de modifier la configuration du robot et qui sera utilisé pour respecter le passage par un point fixe. Cette configuration est imposée par le couple $\tau_{sc,n}$ que nous appellerons couple dédié à l'espace contraint.

En multipliant la relation (4.3) par J_t^{+T} , il est possible de montrer qu'au niveau de l'organe terminal du robot, l'effort total généré par le couple de commande τ_{sc} est uniquement égal à l'effort $F_{sc,t}$ défini par la tâche de télé-opération. Le découplage tâche-posture permet alors au couple $\tau_{sc,p}$ (et $\tau_{sc,n}$) d'imposer la posture du robot sans agir sur la tâche. C'est la propriété essentielle du découplage tâche-posture. Cependant, ce découplage ne prend pas en compte l'effet de la tâche sur la posture imposée. Or la tâche doit effectivement être considérée dans la synthèse du couple $\tau_{sc,n}$ comme le suggèrent [Khatib *et al.*, 2004] et [Sentis et Khatib, 2005].

4.2.2.2 Télé-opération et commande dynamique de l'organe terminal

Soit le robot esclave D2M2 à $n = 5$ degrés de liberté selon lesquels il est possible de réaliser la télé-opération ($m = 5$). La prise en compte du passage par le trocart conduit à la perte de deux degrés de liberté opérationnels. La tâche de télé-opération se réalise alors suivant les trois directions x , y et z du repère de base R_0 . Le nombre de degrés de liberté opérationnels devient $m = 3$, ce qui rend le robot redondant par rapport à la tâche de télé-opération ($n > m$) [Siciliano, 1990]. Le découplage tâche-posture peut alors être appliqué.

Soit le vecteur de couple moteur de commande $\tau_{sc,t}$ dédié à la tâche et défini par

$$\tau_{sc,t} = J_t^T F_{sc,t}, \quad (4.5)$$

où la matrice jacobienne du robot J_t est de dimension (3×5) et $F_{sc,t}$ est l'effort de commande agissant dans l'espace opérationnel et dédié à la tâche de télé-opération (produit par le couple $\tau_{sc,t}$). Il est calculé à partir du modèle dynamique du robot exprimé dans l'espace cartésien [Khatib, 1987]

$$F_{sc,t} = \hat{M}_{x,t}(q) f^* + \hat{V}_{x,t}(q, \dot{q}) + \hat{G}_{x,t}(q) + \hat{F}_e, \quad (4.6)$$

où $\hat{F}_e$ de dimension (3×1) est une estimation des efforts appliqués selon les trois directions de déplacement. $\hat{M}_{x,t}$, $\hat{V}_{x,t}$ et $\hat{G}_{x,t}$ sont les estimations respectives de

$$M_{x,t} = J_t^{+T} M(q) J_t^+, \quad (4.7)$$

$$\mathbf{V}_{x,t} = \mathbf{J}_t^{+T} \mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{M}_{x,t} \dot{\mathbf{J}}_t \dot{\mathbf{q}} \quad (4.8)$$

et

$$\mathbf{G}_{x,t} = \mathbf{J}_t^{+T} \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (4.9)$$

dans lesquels la pseudo-inverse généralisée à droite $\mathbf{J}_t^+$ de $\mathbf{J}_t$ est calculée afin de minimiser l'énergie cinétique du robot suivant la relation [Khatib, 1987]

$$\mathbf{J}_t^+ = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) \mathbf{J}_t^T (\mathbf{J}_t \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) \mathbf{J}_t^T)^{-1} \quad (4.10)$$

La commande $\mathbf{f}^*$ dans la relation (4.6) est un vecteur de dimension (3×1) donnée par :

$$\mathbf{f}^* = \begin{bmatrix} f_x^* & f_y^* & f_z^* \end{bmatrix}^T, \quad (4.11)$$

où f_x^* , f_y^* et f_z^* représentent la commande f^* , respectivement suivant les directions x , y et z (voir paragraphe 2.3.2 et Figure 2.5).

4.2.2.3 Gestion de la contrainte du trocar

Considérons le point donné par la projection du trocar sur l'instrument du robot **D2M2** (cf. Figure 4.1). Ce point est défini dans le repère R_0 par le vecteur de coordonnées cartésiennes $\mathbf{X}_n = [X_{n,x} \ X_{n,y} \ X_{n,z}]^T$. Le passage par le trocar impose idéalement que

$$\begin{cases} X_{n,x} = X_{tr,x} \\ X_{n,y} = X_{tr,y} \end{cases}. \quad (4.12)$$

La stratégie de commande de l'espace contraint consiste alors à réaliser la commande du vecteur de position réduit $[X_{n,x} \ X_{n,y}]^T$ pour atteindre des valeurs de consigne constantes données par le vecteur de position réduit du trocar $[X_{tr,x} \ X_{tr,y}]^T$. Le principe repose alors sur la commande en position, selon deux directions de l'espace opérationnel, d'un robot virtuel dont la position de l'effecteur serait donnée par $\mathbf{X}_n$. Comme le montre la Figure 4.3, le robot **D2M2** et le robot virtuel sont identiques sauf pour la longueur de leurs instruments. Ainsi, à partir de la position X_{tr} du trocar et des paramètres géométriques et dynamiques du robot **D2M2**, le modèle du robot virtuel sera établi. Une commande en position opérationnelle lui sera finalement synthétisée.

Modélisation du robot virtuel

La position $\mathbf{X}_n$ de l'organe terminal du robot virtuel est donnée en fonction de la configuration $\mathbf{q}$ et du modèle géométrique du robot **D2M2**. Elle est calculée en fonction de la position $\mathbf{X}_{s-1}$ de l'extrémité de l'instrument fixée au robot **D2M2** et de la position de son effecteur $\mathbf{X}_s$ suivant

$$\mathbf{X}_n = \mathbf{X}_s + (\mathbf{X}_{s-1} - \mathbf{X}_s)\rho, \quad (4.13)$$

avec

$$\rho = -\frac{(\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{tr}) \cdot (\mathbf{X}_{s-1} - \mathbf{X}_s)}{|\mathbf{X}_{s-1} - \mathbf{X}_s|^2}, \quad (4.14)$$

où $\cdot$ est le produit scalaire.

La seule différence entre le robot virtuel et le robot **D2M2** est la longueur de leurs instruments. Celle du robot virtuel est donnée par $R_{inst,virt}$ et peut être calculée à partir des coordonnées $\mathbf{X}_n$ et $\mathbf{X}_{s-1}$.

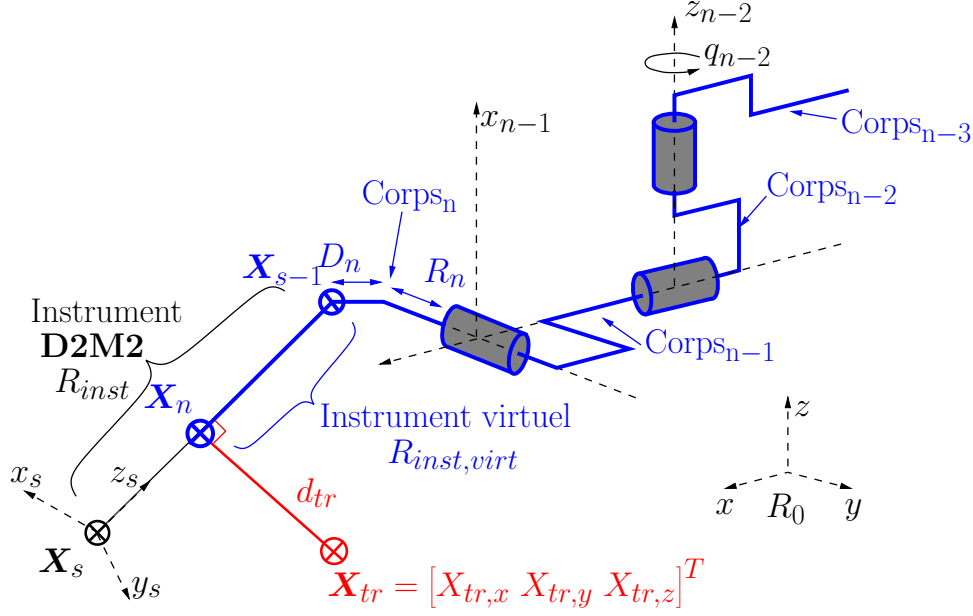


Figure 4.3 - Définition d'un robot virtuel pour la commande de l'espace contraint et le respect du passage par un point fixe.

Dans la suite, afin de simplifier les écritures, nous supposons que les vecteurs de position du robot virtuel X_n et celui du trocart X_{tr} sont des vecteurs de positions réduits contenant uniquement les composantes selon les deux directions x et y de R_0 . Ils sont donnés par :

$$X_n = \begin{bmatrix} X_{n,x} \\ X_{n,y} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad X_{tr} = \begin{bmatrix} X_{tr,x} \\ X_{tr,y} \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

Le modèle cinématique reliant les vitesses articulaires $\dot{\mathbf{q}}$ aux vitesses opérationnelles du robot virtuel selon les deux directions x et y du repère R_0 est alors défini par

$$\dot{X}_n = J_n(q)\dot{\mathbf{q}}, \quad (4.16)$$

où J_n est la matrice jacobienne de dimension (2×5) du robot virtuel. Cette matrice dépend de $R_{inst,virt}$ et doit être mise à jour à chaque période d'échantillonnage.

L'application du vecteur de couple $\tau_{sc,n}$ produit un effort de commande dans l'espace opérationnel $F_{sc,n}$ de dimension (2×1) au niveau de l'effecteur du robot virtuel. Ces deux grandeurs sont reliées par la matrice jacobienne J_n telle que

$$\tau_{sc,n} = J_n^T F_{sc,n}. \quad (4.17)$$

En négligeant la masse de l'instrument du robot **D2M2**, les deux robots possèdent un modèle dynamique identique. Celui du robot virtuel s'exprime dans l'espace cartésien par

$$M_{x,n}(q)\ddot{X}_n + V_{x,n}(q, \dot{q}) + G_{x,n}(q) = F_{sc,n} - F_{e,n} + F_{in,t,n}, \quad (4.18)$$

où $M_{x,n}$, $V_{x,n}$ et $G_{x,n}$ sont respectivement donnés par les relations (4.7)-(4.10) dans lesquelles la matrice jacobienne J_t est remplacée par J_n . $F_{e,n}$ est le vecteur de dimension (2×1) des efforts extérieurs exercés par le robot virtuel sur son environnement. Il est défini par les deux composantes en x et y du vecteur des efforts F_e appliqués par le robot **D2M2** sur son environnement (la transformation géométrique entre F_e et $F_{e,n}$ est l'identité). Le vecteur $F_{in,t,n}$, de dimension (2×1) , est le vecteur des efforts induits par la tâche

de télé-opération sur l'espace contraint [Khatib *et al.*, 2004], [Sentis et Khatib, 2005]. Il représente l'effet de la tâche sur la position du robot virtuel. Il est donné par

$$\mathbf{F}_{in,t,n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{M}}_{x,t}(\mathbf{q}) \mathbf{f}^*. \quad (4.19)$$

où $\hat{\mathbf{M}}_{x,t}$ est la matrice d'inertie du robot **D2M2** donnée par la relation (4.7)

En choisissant l'effort de commande $\mathbf{F}_{sc,n}$ sous la forme

$$\mathbf{F}_{sc,n} = \hat{\mathbf{M}}_{x,n}(\mathbf{q}) \mathbf{f}_n^* + \hat{\mathbf{V}}_{x,n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \hat{\mathbf{G}}_{x,n}(\mathbf{q}) + \hat{\mathbf{F}}_{e,n} - \mathbf{F}_{in,t,n}, \quad (4.20)$$

et en supposant une estimation parfaite de $\mathbf{M}_{x,n}$, $\mathbf{V}_{x,n}$, $\mathbf{G}_{x,n}$ et $\mathbf{F}_{e,n}$, la commande de l'espace contraint se réduit à la commande de deux systèmes linéaires, invariants, découplés et du second ordre définis par

$$\ddot{\mathbf{X}}_n(t) = \mathbf{f}_n^*(t - T_d) \quad (4.21)$$

et dont la sortie à commander, notée $\mathbf{y}_n(t) = \mathbf{X}_n(t)$, est la position du robot virtuel selon les deux directions x et y . Étant identiques et parfaitement découplées, nous admettons que les variables y_n , X_n , X_{tr} et f_n^* représentent respectivement les composantes, selon une des deux directions données, des vecteurs $\mathbf{y}_n$, $\mathbf{X}_n$, $\mathbf{X}_{tr}$ et $\mathbf{f}_n^*$.

En définissant deux variables d'état $x_{1,n}(t) = y_n(t)$ et $x_{2,n}(t) = \dot{y}_n(t)$, la représentation d'état du système est donnée par

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1,n}(t) \\ \dot{x}_{2,n}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,n}(t) \\ x_{2,n}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f_n^*(t - T_d). \quad (4.22)$$

En considérant que le système est précédé d'un bloqueur d'ordre zéro et que la sortie est échantillonnée à la fréquence $1/h$, la représentation d'état discrète du système (4.22) est donnée par

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{r,n,k} = \Phi_{r,n} \mathbf{x}_{r,n,k-1} + \Gamma_r f_{n,k-1}^* \\ y_{n,k} = \mathbf{C}_r \mathbf{x}_{r,n,k} \end{cases} \quad (4.23)$$

dans laquelle

$$\mathbf{x}_{r,n,k} = \begin{bmatrix} x_{1,n,k} & x_{2,n,k} & f_{n,k-d}^* & \cdots & f_{n,k-2}^* & f_{n,k-1}^* \end{bmatrix}^T \quad (4.24)$$

et $\Phi_{r,n}$ de dimension $((2+d) \times (2+d))$ est

$$\Phi_{r,n} = \begin{bmatrix} \Phi_{1,n} & \Gamma_{1,n} & \Gamma_{0,n} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.25)$$

Les expressions analytiques des matrices $\Phi_{1,n}$, $\Gamma_{1,n}$ et $\Gamma_{0,n}$ sont obtenues à partir des équations (2.27)-(2.29) dans lesquelles les matrices d'état et de commande du système (4.22) ont été utilisées. Elles sont respectivement données par :

$$\Phi_{1,n} = \begin{bmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.26)$$

$$\Gamma_{1,n} = \begin{bmatrix} \frac{h^2}{2} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.27)$$

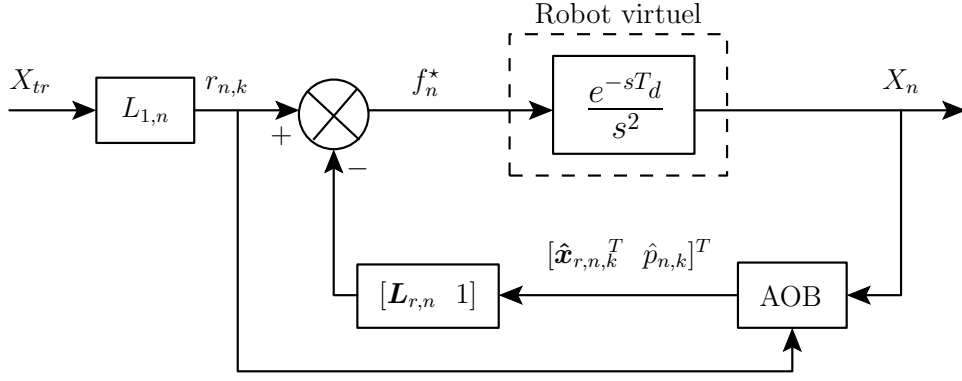


Figure 4.4 - Architecture de commande en position dans l'espace contraint intégrant un observateur actif de l'état (AOB) et une technique de commande par retour d'état.

et

$$\Gamma_{0,n} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (4.28)$$

À partir de la représentation d'état discrète donnée par les relations (4.23)-(4.28), il est possible d'appliquer une stratégie de commande en position utilisant l'observateur actif de l'état présenté précédemment dans le Chapitre 2 au §2.3.2. Dans le paragraphe suivant, nous présentons les étapes les plus importantes permettant son application à la commande en position du robot virtuel.

Synthèse de la commande de l'espace contraint

Nous réalisons la commande en position du robot virtuel en utilisant une stratégie de commande par retour d'état avec un gain $L_{r,n}$ dont la dimension est $(1 \times (2 + d))$. Les erreurs structurelles ou paramétriques dans le modèle (4.23)-(4.28), sont représentées par un état actif $p_{n,k}$ d'ordre 1. En considérant la commande par retour d'état estimé

$$f_{n,k-1}^* = r_{n,k-1} - \begin{bmatrix} L_{r,n} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{r,n,k-1} \\ \hat{p}_{n,k-1} \end{bmatrix}, \quad (4.29)$$

où la reconstruction de l'état $[\mathbf{x}_{r,n,k}^T \ p_{n,k}]^T$ est réalisée par un observateur actif établi selon le modèle désiré en boucle fermée (cf. Chapitre 2). Le modèle d'estimation d'état s'écrit

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{r,n,k} \\ \hat{p}_{n,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{r,n} - \Gamma_r L_{r,n} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{r,n,k-1} \\ \hat{p}_{n,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_r \\ 0 \end{bmatrix} r_{n,k-1} + K_{n,k}(y_{n,k} - \hat{y}_{n,k}), \quad (4.30)$$

avec

$$\hat{y}_{n,k} = C_a \left(\begin{bmatrix} \Phi_{r,n} - \Gamma_r L_{r,n} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{r,n,k-1} \\ \hat{p}_{n,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_r \\ 0 \end{bmatrix} r_{n,k-1} \right). \quad (4.31)$$

Le gain d'estimation de Kalman $K_{n,k}$ de dimension $((2 + d + 1) \times 1)$ est calculé selon les relations (2.70)-(2.72) en utilisant les matrices d'état et de covariance $Q_{x_{r,n,k}}$, $Q_{p_{n,k}}$ et $R_{n,k}$ relatives au système à observer défini par (4.23)-(4.28).

La commande en position du robot virtuel est déterminée par le retour d'état $L_{r,n}$ pour imposer un comportement critique apériodique avec une constante de temps $T_{cl,n}$ en boucle fermée (facteur d'amortissement $\zeta = 1$). $L_{r,n}$ est calculé suivant la formule



Figure 4.5 - Plate-forme expérimentale et simulateur pour le passage par un point fixe.

Paramètre	K_2	$K_{s,n}$	T_{cl}	$Q_{k1,1}$	$Q_{k2,2}$	$Q_{ki,i}$	Q_{pk}	R_k	P_0
Unité	[Ns/m]	[N/m]	[s]	[N ²]	[N ² /s ²]	[N ²]	[N ²]	[N ²]	
x	5	300	0.06	10^{-9}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-3}	100	Q_k
y	5	300	0.06	10^{-9}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-3}	100	Q_k
z	5	300	0.06	10^{-9}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-3}	100	Q_k

Tableau 4.1 - Paramètres de modélisation, d'estimation et de commande par retour d'état pour une télé-opération avec prise en compte du passage par un point fixe ($i = 3, \dots, 7$). L'unité de chaque élément de P_0 dépend de l'état qui lui correspond.

d'Ackermann donnée par les relations (2.43)-(2.45) en considérant les matrices $\Phi_{r,n}$ et Γ_r [Ogata, 2002]. Afin d'imposer un gain statique unitaire en boucle fermée, $r_{n,k-1}$ dans (4.29) est donné par

$$r_{n,k-1} = L_{1,n} X_{tr}, \quad (4.32)$$

où

$$L_{1,n} = (C_r(I_{(2+d)} - (\Phi_{r,n} - \Gamma_r L_{r,n}))^{-1} \Gamma_r)^{-1}. \quad (4.33)$$

Une vue schématique de la commande du robot virtuel est donnée sur la Figure 4.4. Ce schéma doit être appliqué pour chacune des deux directions x et y du repère R_0 .

4.2.3 Analyse expérimentale

L'architecture de télé-opération avec prise en compte du passage par le trocart a été validée expérimentalement sur la plate-forme **D2M2**. Les expérimentations correspondent à une télé-opération en espace libre suivant les trois directions de l'espace de travail opérationnel du robot **D2M2**. Aucune interaction avec un objet n'a été établie. Une boîte en plastique transparent simule le passage par le trocart (Figure 4.5). Elle possède un trou que nous considérons comme un point fixe à travers lequel il est possible de passer l'instrument.

Pour chacune des directions opérationnelles, les paramètres de télé-opération sont

$$\beta_{p,j} = 0.7, \quad \beta_{f,j} = 0.5 \quad \text{et} \quad K_{v,j} = 1000 \quad [\text{N/m}] \quad \text{avec} \quad j = x, y, z. \quad (4.34)$$

Paramètre	$T_{cl,n}$	$Q_{n,k_{1,1}}$	$Q_{n,k_{2,2}}$	$Q_{n,k_{i,i}}$	$Q_{p_{n,k}}$	$R_{n,k}$	$\mathbf{P}_{n,0}$
Unité	[s]	[m ²]	[m ² /s ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	
x	0.0035	0.7	10^{-12}	10^{-12}	3500	100	$Q_{n,k}$
y	0.0035	0.7	10^{-12}	10^{-12}	3500	100	$Q_{n,k}$

Tableau 4.2 - Paramètres d'estimation et de commande par retour d'état de l'espace contraint ($i = 3, \dots, 7$). L'unité de chaque élément de $\mathbf{P}_{n,0}$ dépend de l'état qui lui correspond.

Les paramètres pour l'estimation de l'état (relations (2.67)-(2.73)), la commande par retour d'état (relations (2.43)-(2.46)) et le retour en vitesse K_2 sont donnés dans le Tableau 4.1. Les paramètres considérés pour la commande de l'espace contraint (estimation et commande par retour d'état (4.29)-(4.33)) sont donnés dans le Tableau 4.2.

L'expérience débute par une télé-manipulation libre du robot vers le point fixe afin d'introduire l'instrument à travers le trocart. La position $\mathbf{X}_{tr}$ du point fixe est alors apprise par le robot dans son repère de base R_0 .

Tâche de télé-manipulation

Durant cette expérience, l'opérateur télé-opère le robot **D2M2** qui se déplace dans un espace libre tout en respectant le passage par un point fixe. Les tracés de la Figure 4.6 montrent les résultats de suivi de trajectoire durant cette expérience. Ces données présentent la position cartésienne du bras maître et celle du robot esclave établies dans le repère de base R_0 . La mise en correspondance entre les deux positions a été faite à un instant $t_0 = 0$ [s] qui représente le début de l'expérience. Ces résultats montrent la capacité du robot esclave à reproduire les gestes de l'opérateur. Ils ont été obtenus grâce à la faible valeur choisie pour la raideur nominale $K_{s,n}$ (selon les trois directions). Les erreurs de poursuite suivant les trois directions sont visibles sur la Figure 4.7. Elles illustrent les performances de suivi de trajectoire obtenues grâce à la stratégie de télé-opération et de commande du robot esclave.

La Figure 4.8 montre les efforts désirés F_d et estimés $\hat{y}$ obtenus lors de cette expérience. Puisque la manipulation se réalise dans un espace libre, les efforts mesurés F_e sont très faibles selon toutes les directions. Ils ne sont donc pas représentés. Les efforts désirés F_d sont, après multiplication par $-\beta_f$, ressentis par l'opérateur au niveau de l'interface haptique. L'évolution des efforts désirés est due aux choix des paramètres de commande (faibles valeurs de β_p et T_{cl}) et d'estimation (valeur élevée de Q_{p_k}) qui permet un meilleur suivi de trajectoire donc une plus faible erreur en position. Comparés à ceux obtenus lors d'une télé-opération en espace libre sans prise en compte de la contrainte du point fixe, ces efforts sont de faibles amplitudes et présentent des oscillations (cf. Chapitre 2, paragraphe 2.4.2.1, Figure 2.9). Cependant, ces oscillations sont filtrées par le système de télé-opération et ne sont pas perçues par l'opérateur. L'évolution de la variable de commande $u_k = L_1 F_d - [\mathbf{L}_r \ 1] [\hat{\mathbf{x}}_{r,k}^T \ \hat{p}_k]^T$ ainsi que celle de l'état actif $-\hat{p}_k$ selon les trois directions sont présentées sur la Figure 4.9. Les erreurs de modélisation font que la quasi-totalité de la commande u_k est formée par l'état actif $-\hat{p}_k$ (cf. Chapitre 2, paragraphe 2.4.2.1).

La distance d_{tr} entre l'instrument et le point fixe est donnée sur la Figure 4.10. Elle ne dépasse pas 8 [mm].

4.2. Chirurgie mini-invasive et passage par le trocart

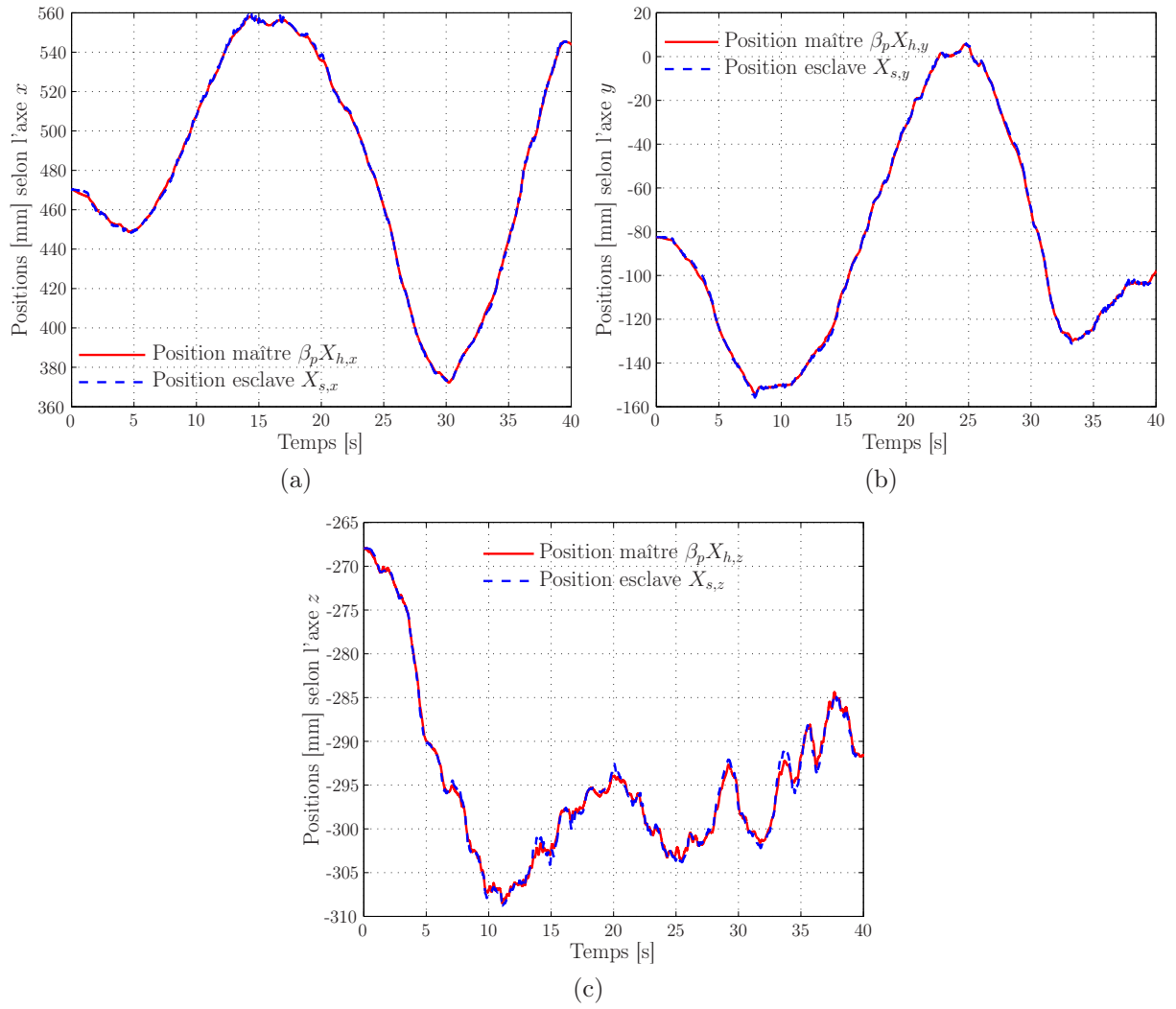


Figure 4.6 - *Suivi en position avec prise en compte du passage par le point fixe d'une trajectoire en espace libre imposée par l'opérateur : suivi de trajectoire suivant (a) la direction x , (b) la direction y et (c) la direction z du repère R_0 .*

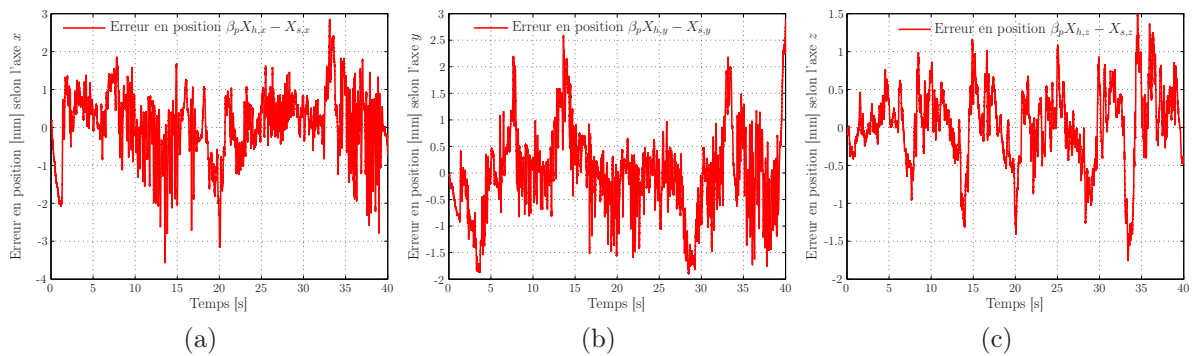


Figure 4.7 - *Erreurs de poursuite $\beta_p X_h - X_s$ lors d'une télé-opération en espace libre avec prise en compte du passage par le point fixe suivant : (a) la direction x , (b) la direction y et (c) la direction z du repère R_0 .*

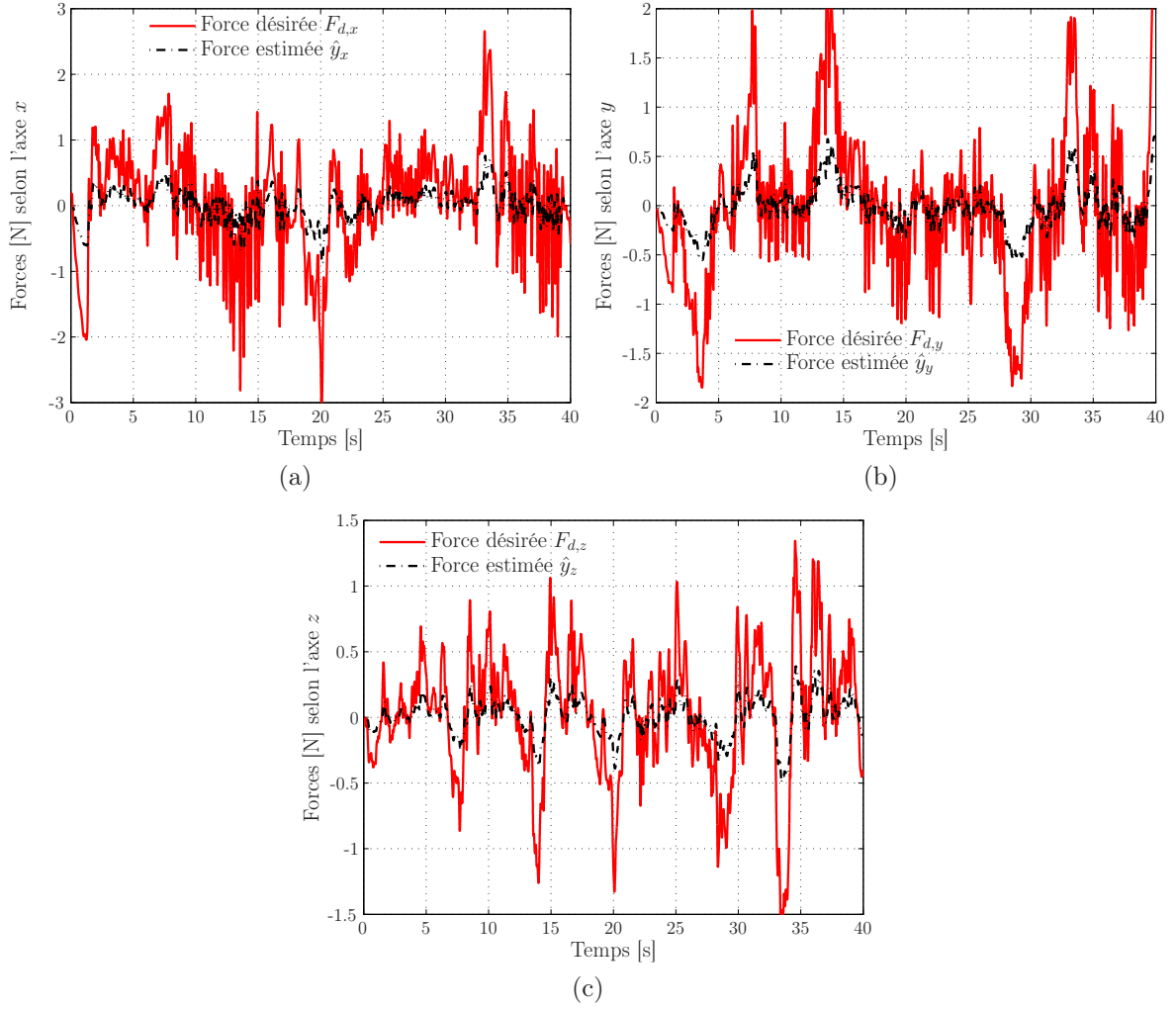


Figure 4.8 - Efforts estimés $\hat{y}$ et désirés F_d lors d'une télé-opération en espace libre avec prise en compte du passage par le point fixe : (a) efforts suivant la direction x , (b) efforts suivant la direction y et (c) efforts suivant la direction z du repère R_0 . $-\beta_f F_d$ représente l'effort ressenti par l'opérateur au niveau du bras haptique **PHANTOM** 1.5.

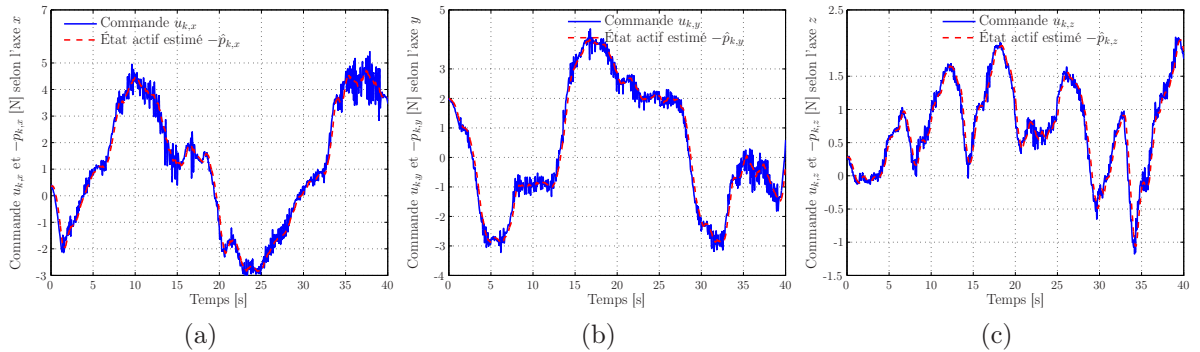


Figure 4.9 - L'état actif estimé $-\hat{p}_k$ et la commande par retour d'état u_k lors d'une télé-opération en espace libre avec prise en compte du passage par le point fixe : (a) suivant la direction x , (b) suivant la direction y et (c) suivant la direction z du repère R_0 .

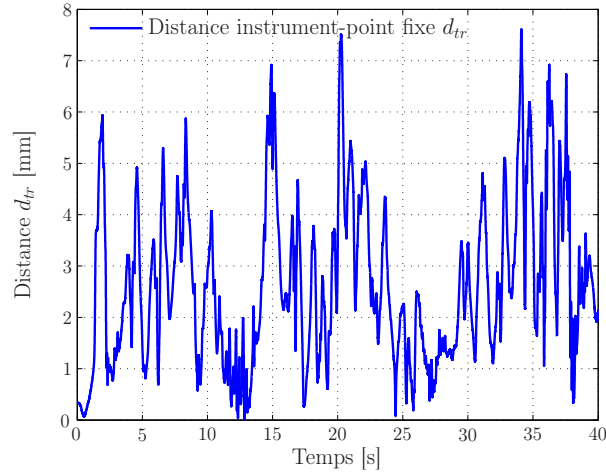


Figure 4.10 - Respect du passage par le point fixe : distance d_{tr} instrument - point fixe.

Commande de l'espace contraint

Tout au long du mouvement, la position $[X_{n,x} \ X_{n,y}]^T$ ainsi que le modèle cinématique $\mathbf{J}_n$ du robot virtuel sont mis à jour. Le respect du passage par le point fixe, illustré par la Figure 4.10, a été obtenu grâce à la commande de l'espace contraint qui impose au robot virtuel d'être dans une position $[X_{n,x} \ X_{n,y}]^T$, voisine de celle du trocart $[X_{tr,x} \ X_{tr,y}]^T$. La Figure 4.11 montre les positions mesurées, désirées et estimées du robot virtuel selon les deux directions x et y de R_0 . Les positions $\hat{y}_n$ sont celles estimées par l'observateur actif et utilisées pour la commande par retour d'état de l'espace contraint. L'évolution de cette commande $f_{n,k}^* = L_{1,n}X_{tr} - [\mathbf{L}_{r,n} \ 1] [\hat{\mathbf{x}}_{r,n,k}^T \ \hat{p}_{n,k}]^T$ ainsi que celle de l'état actif $-\hat{p}_{n,k}$ selon les deux directions sont illustrées sur la Figure 4.12.

Synthèse et discussion

Sur la Figure 4.9, on constate que l'amplitude de la commande dédiée à la tâche $u_k = L_1 F_d - [\mathbf{L}_r \ 1] [\hat{\mathbf{x}}_{r,k}^T \ \hat{p}_k]^T$ suivant les deux directions x et y est élevée comparée à celle d'une télé-opération en espace libre sans prise en compte de la contrainte du point fixe (cf. Chapitre 2, paragraphe 2.4.2.1, Figure 2.10). Contrairement à l'étude théorique du découplage tâche-posture (cf. paragraphe 4.2.2.1), les résultats expérimentaux montrent que la commande de l'espace contraint $f_{n,k}^*$ (cf. Figure 4.12) agit sur la réalisation de la tâche. Ceci est essentiellement dû au fait que le découplage tâche-posture nécessite une connaissance parfaite du modèle cinématique et dynamique du robot [Khatib, 1987].

La commande dédiée à la tâche et celle de l'espace contraint génèrent respectivement le vecteur de couple $\boldsymbol{\tau}_{sc,t}$ et $\boldsymbol{\tau}_{sc,n}$. Le couple de posture $\boldsymbol{\tau}_{sc,p}$ est calculé à partir de la projection du couple $\boldsymbol{\tau}_{sc,n}$ dans le noyau de $\mathbf{J}_t^T$ (relation (4.4)). L'évolution de ces trois couples de commande pour chacune des articulations du robot **D2M2** est illustrée sur la Figure 4.13. Nous rappelons que le couple total $\boldsymbol{\tau}_{sc}$ appliqué à chacune des articulations est la somme des deux couples $\boldsymbol{\tau}_{sc,t}$ et $\boldsymbol{\tau}_{sc,p}$ (relation (4.3)).

Nous remarquons que le couple dédié à l'espace contraint $\tau_{sc,n,1}$ généré pour la première articulation est nul (cf. Figure 4.13). Cette articulation prismatique permet des déplacements selon l'axe z de R_0 ; ce qui est normal puisque la commande de l'espace contraint impose une position désirée du robot virtuel selon les deux directions x et y du repère R_0 . Cependant, la projection du vecteur de couples $\boldsymbol{\tau}_{sc,n}$ permet de générer un couple de posture non nul pour cette articulation.

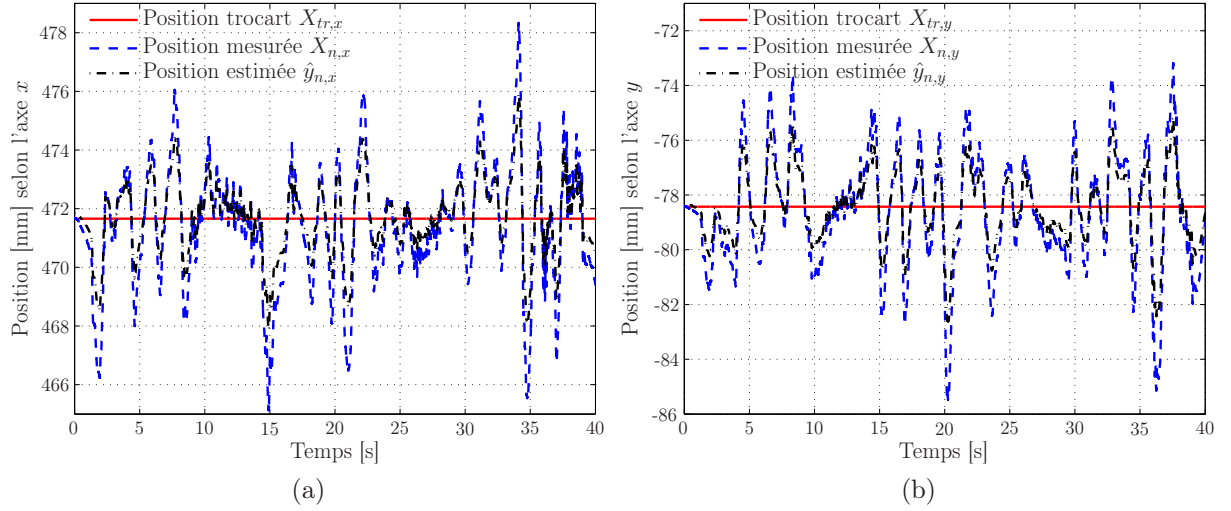


Figure 4.11 - Positions désirées $\mathbf{X}_{tr}$, mesurées $\mathbf{X}_n$ et estimées $\hat{\mathbf{y}}_n$ du robot virtuel pour la prise en compte du passage par le point fixe : (a) commande en position suivant la direction x et (b) commande en position suivant la direction y du repère R_0 .

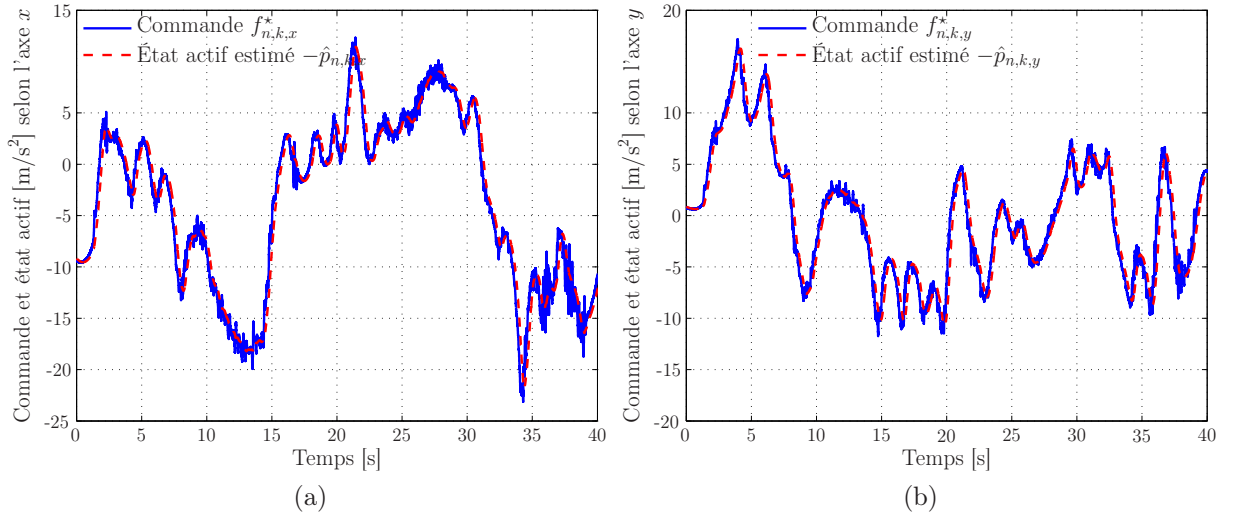


Figure 4.12 - L'état actif estimé $-\hat{p}_{n,k}$ et la commande par retour d'état $f_{n,k}^*$ appliquée au robot virtuel pour la prise en compte du passage par le point fixe : (a) suivant la direction x et (b) suivant la direction y du repère R_0 .

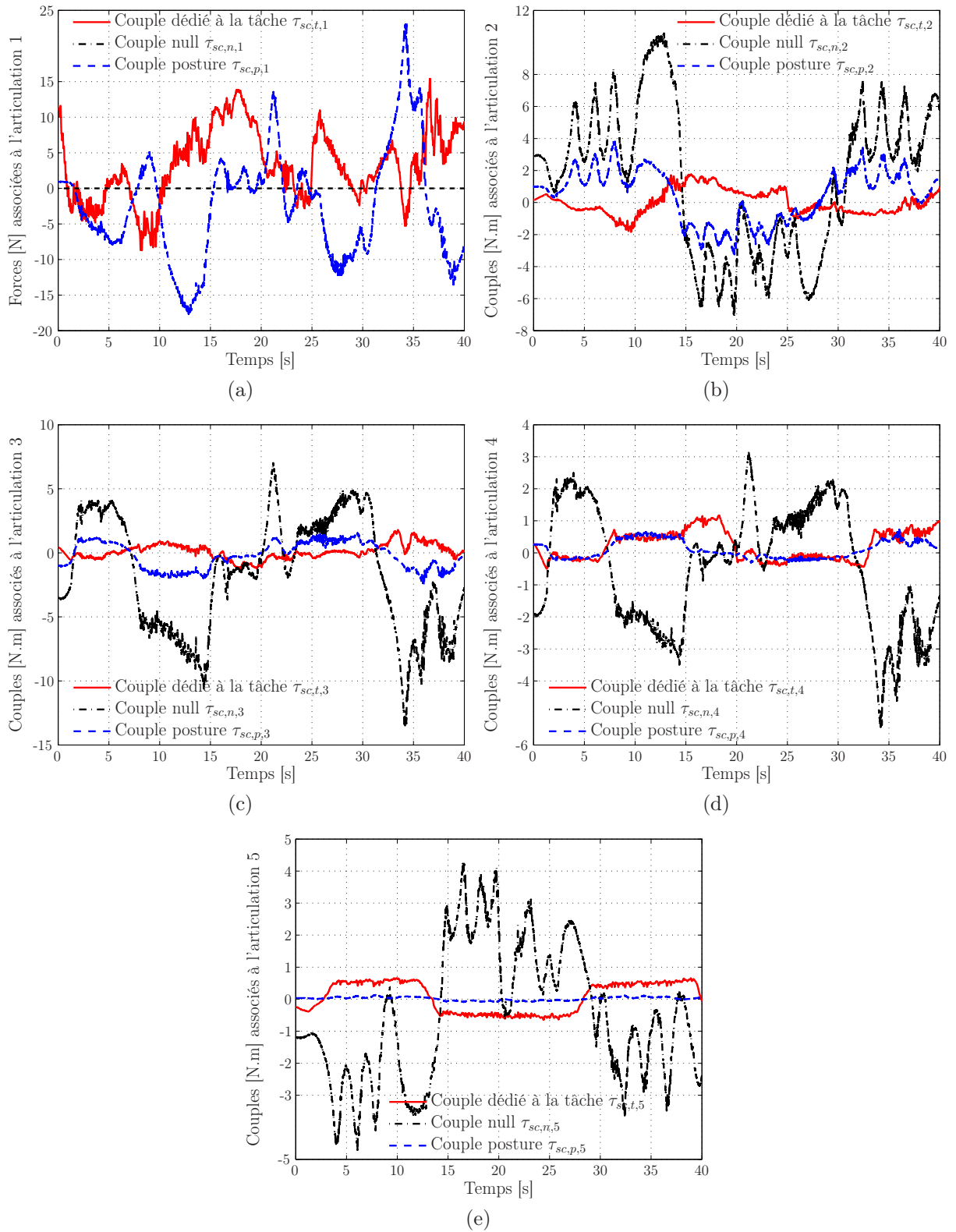


Figure 4.13 - Couples dédiés à la tâche ($\tau_{sc,t}$), à l'espace contraint ($\tau_{sc,n}$) et à la posture ($\tau_{sc,p}$) appliqués lors d'une télé-opération dans un espace libre avec prise en compte du passage par le point fixe : (a) couples appliqués à l'articulation 1, (b) couples appliqués à l'articulation 2, (c) couples appliqués à l'articulation 3, (d) couples appliqués à l'articulation 4 et (e) couples appliqués à l'articulation 5.

Mise à part l'articulation prismatique, les amplitudes des couples $\tau_{sc,n,i}$ ($i = 2 \dots 5$) dédiés à l'espace contraint sont élevées comparées à celles des couples dédiés à la tâche $\tau_{sc,t,i}$. Néanmoins, la projection du vecteur $\tau_{sc,n}$ génère un couple de posture $\tau_{sc,p}$ très faible pour l'articulation 4 et presque nul pour l'articulation 5. Ceci peut s'expliquer par une mauvaise estimation des paramètres dynamiques du robot **D2M2**. Cette erreur d'estimation paramétrique peut aussi être visible sur les tracés de la commande dédiée à la tâche $u_k = L_1 F_d - [L_r \ 1] [\hat{x}_{r,k}^T \ \hat{p}_k]^T$ et à l'espace contraint $f_{n,k}^* = L_{1,n} X_{tr} - [L_{r,n} \ 1] [\hat{x}_{r,n,k}^T \ \hat{p}_{n,k}]^T$ qui sont principalement engendrées par les états actifs $-\hat{p}_k$ et $-\hat{p}_{n,k}$ (cf. Figures 4.9 et 4.12). Ceci étant, même en présence d'erreur de modélisation, le passage par un point fixe a été respecté avec une distance d_{tr} inférieure à 8 [mm].

Ces résultats ont fait l'objet d'une publication à IROS'06 [Cortezão *et al.*, 2006b]. Ils ont également fait partie des résultats publiés à Surgetica'07 [Zarrad *et al.*, 2007b].

4.3 Vers la compensation des mouvements physiologiques

4.3.1 Assistance en chirurgie cardiaque

Les premiers résultats de compensation de mouvements en chirurgie cardiaque ont été présentés dans [Nakamura *et al.*, 2001]. Ces résultats ont été obtenus *in-vivo* en utilisant un robot à 4 ddl spécialement conçu pour être fixé sur l'écarteur sternal. Il est contrôlé par des techniques d'asservissement visuel pour réaliser le suivi selon deux directions d'une pastille posée à la surface du cœur. Les auteurs présentent aussi des résultats de téléopération du robot qui effectue, en même temps le suivi d'une cible laser. Ces résultats n'ont pas été obtenus *in-vivo* mais en projetant la cible laser sur un papier et en lui imposant des mouvements oscillatoires de fréquence 1.5 [Hz].

En se basant également sur des stratégies d'asservissement visuel, le LSIIT [Ginhoux *et al.*, 2005], [Gangloff *et al.*, 2006] obtient des résultats de compensation de mouvements cardiaques réalisées *in-vivo* et selon trois directions. Les images utilisées pour la commande du robot proviennent d'une caméra fixe qui observe l'ensemble du champ opératoire. Pour faciliter l'extraction des mouvements, quatre DELs¹ ont été fixées sur un support lui-même placé à la surface du cœur. Une autre DEL et un pointeur laser ont été placés sur l'instrument du robot afin de mesurer la distance instrument - cœur. La compensation est réalisée grâce à un algorithme de commande de type prédictif qui considère que les mouvements du cœur sont des perturbations périodiques et de période connue. Les fréquences considérées (environ 1.5 [Hz] pour les battements du cœur et 0.25 [Hz] pour la respiration) sont supposées stables et imposées par le respirateur artificiel.

Une stratégie de commande prédictive a également été utilisée dans [Çavuşoğlu *et al.*, 2005], où une interface haptique de type **PHANToM** a été contrôlée pour suivre des mouvements cardiaques pré-enregistrés. Ces mouvements ont été mesurés grâce à un système de mesure ultrasonore **Sonomicrometry**TM qui utilise des capteurs piezoélectriques fixés à la surface du cœur. Avec la même plate-forme expérimentale, Bebek et Çavuşoğlu [Bebek et Çavuşoğlu, 2006] ont ensuite réalisé un suivi du cœur selon trois directions en utilisant, en plus des mouvements cardiaques pré-enregistrés, les mesures ECG² correspondantes.

¹pour : *Diodes Electro-Luminescentes*

²pour *ÉlectroCardioGramme*.

Les données ECG sont utilisées pour prédire et prendre en compte les déplacements futurs dans la stratégie de commande prédictive.

L'objectif commun aux trois solutions proposées précédemment est de garder l'instrument du robot à une distance fixe par rapport à l'organe en mouvement. Cependant, la réelle difficulté pour le chirurgien lors d'une intervention chirurgicale cardiaque à cœur battant apparaît lorsque ses instruments sont en contact avec l'organe. En effet, les mouvements physiologiques induisent des perturbations périodiques dans les efforts appliqués par l'instrument. Ces perturbations sont mentalement compensées par le chirurgien afin de maintenir un effort désiré pour réaliser son geste. Actuellement, la seule solution proposée pour compenser ses perturbations périodiques en effort a été présentée dans [Cagneau *et al.*, 2007]. En considérant que ces perturbations sont de période connue, les auteurs proposent une architecture de commande dont le principe consiste à appliquer une entrée de consigne en fonction des erreurs d'asservissement enregistrées à la période précédente.

C'est pour alléger le travail du chirurgien lors d'une intervention cardiaque à cœur battant que nous proposons de compenser les perturbations périodiques dans les efforts appliqués par l'instrument sur l'organe en mouvement. Cette compensation sera bien évidemment basée sur l'architecture de commande en effort appliquée au robot esclave **D2M2** et présentée dans le §2.3.2 du deuxième chapitre. Nous commencerons alors par évaluer les performances de cette stratégie de commande face au rejet de perturbations périodiques. À la suite des résultats obtenus, nous proposerons d'ajouter à cette commande en effort une composante uniquement dédiée à la compensation des perturbations. Cette dernière sera synthétisée en réalisant l'estimation des perturbations à partir des efforts mesurés et la génération d'une séquence automatique permettant la compensation et le suivi des mouvements. Cette séquence considère que l'atténuation des perturbations en effort induit des perturbations dans la position du robot **D2M2**. L'approche de commande et de compensation des perturbations sera finalement évaluée sur notre plate-forme robotique.

4.3.2 La commande en effort et le rejet de perturbations périodiques

La première approche de compensation des perturbations périodiques repose uniquement sur la commande en effort présentée dans le §2.3.2 du deuxième chapitre. Ainsi, nous avons réalisé une expérience dans laquelle le robot **D2M2** est en contact avec un objet mou. Il y exerce un effort F_e égal à un effort désiré $F_d = -5$ [N] selon l'axe z du repère R_0 . L'objet est la balle en mousse utilisée dans les expérimentations précédentes et illustrée sur la Figure 2.7. Pour simuler les mouvements d'un organe, cet objet a été placé sur un système à 1 ddl (prismatique) capable de réaliser des mouvements rapides. Ce dernier, que nous appellerons simulateur de mouvements, est commandé en position pour réaliser des déplacements périodiques Z^s à une fréquence de 1 [Hz] et d'amplitude $\simeq 10$ [mm] selon l'axe z du repère R_0 du robot **D2M2** (cf. Figure 4.14(a)). L'objet se déplace créant ainsi une perturbation au niveau des efforts mesurés visibles sur la Figure 4.14(b). La commande en effort génère un état actif $-\hat{p}_k$ et une commande u_k (cf. Figure 4.14(c)) qui impose des déplacements sinusoïdaux au robot afin de compenser les perturbations sinusoïdales qui varient entre ± 3 [N] (cf. Figure 4.14(d)). À l'instant $t \simeq 13$ [s], l'effort désiré F_d passe de -5 à -10 [N]. La stratégie de commande en effort permet au robot de se déplacer en vue d'appliquer l'effort désiré. Ce dernier ne sera atteint qu'après l'arrêt total du simulateur à $t \simeq 25$ [s].

Les résultats obtenus montrent que la commande en effort définie dans les chapitres

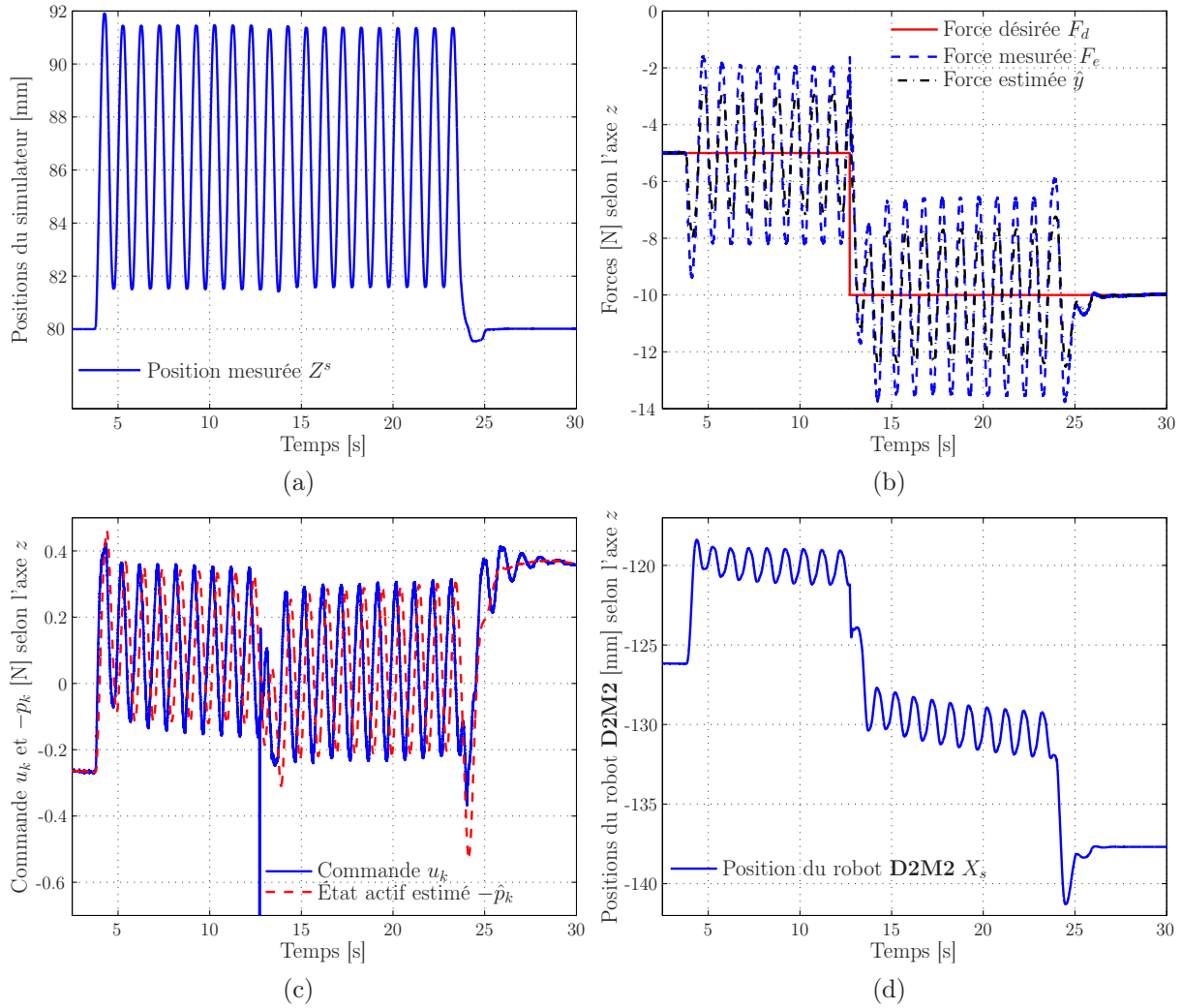


Figure 4.14 - Rejet de perturbations périodiques en effort selon l'axe z du repère R_0 par l'architecture de commande par estimation et retour d'état : (a) position Z^s du simulateur de mouvement, (b) efforts désiré F_d , mesuré F_e et estimé $\hat{y}$, (c) état actif estimé $-\hat{p}_k$ et commande par retour d'état u_k et (d) position du robot **D2M2**.

précédents n'est évidemment pas capable de compenser les mouvements périodiques de l'objet. Une stratégie dédiée à la compensation et au rejet de ces perturbations doit alors être développée.

4.3.3 Rejet de perturbations périodiques en effort

L'architecture de commande intégrant la commande en effort, l'estimation de la raideur de l'environnement et la stratégie de compensation des perturbations de sortie est illustrée sur la Figure 4.15. Sur cette figure, nous avons posé $\bar{u}_k$ la commande totale appliquée à l'entrée du système esclave composé du robot **D2M2** en contact avec son environnement. La stratégie de compensation des perturbations en effort permet la génération d'une commande notée $u_{c,k}$. Afin de séparer l'action de la commande en effort u_k permettant l'application d'un effort désiré et celle de la compensation des perturbations

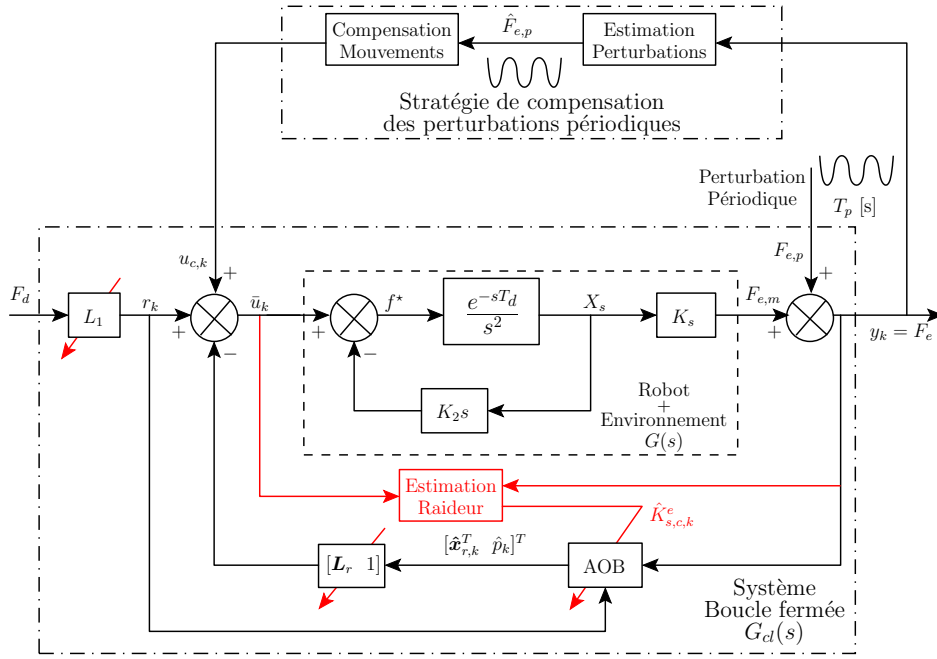


Figure 4.15 - Architecture de commande en effort intégrant la commande par estimation et retour d'état, l'estimation en ligne de la raideur de l'environnement et une compensation de perturbations périodiques de sortie.

$u_{c,k}$, la commande totale $\bar{u}_k$ est

$$\bar{u}_k = u_k + u_{c,k}. \quad (4.35)$$

Le mouvement périodique Z^s du simulateur (de l'organe) génère une perturbation en effort, noté $F_{e,p}$ appliquée à la sortie du système. Nous supposons que cette perturbation est périodique et de période connue T_p . L'effort total mesuré F_e et appliqué par l'instrument du robot sur son environnement est alors donné par

$$F_e = F_{e,m} + F_{e,p}. \quad (4.36)$$

où $F_{e,m}$ est l'effort de sortie lié à l'application d'un effort désiré F_d .

L'atténuation et la compensation des perturbations périodiques en effort $F_{e,p}$ se réalise en deux étapes (bloc "Stratégie de compensation des perturbations périodiques"). La première consiste à effectuer une identification et une estimation de ces perturbations à partir des efforts mesurés F_e . Les perturbations estimées $\hat{F}_{e,p}$ sont ensuite utilisées dans une stratégie de compensation qui permet de générer la commande $u_{c,k}$ à appliquer à l'entrée du système (cf. Figure 4.15). Dans les deux paragraphes suivants, nous exposons la stratégie d'estimation des perturbations périodiques et celle dédiée à leur compensation.

4.3.3.1 Estimation des perturbations en effort

Pour réaliser l'estimation des perturbations en effort, nous appliquons un algorithme d'identification harmonique utilisé pour le rejet adaptatif de perturbations proposé dans [Bodson *et al.*, 1994] et repris dans [Ginhoux, 2003]. L'avantage de cet algorithme est qu'il est extensible à l'identification d'une perturbation constituée de plusieurs signaux sinusoïdaux de fréquences différentes [Bodson *et al.*, 1994]; ce qui est réellement le cas des perturbations induites par un cœur en mouvement. Elles sont composées par les perturbations dues à la respiration et celles dues aux battements cardiaques.

Ètant supposée sinusoïdale de période T_p connue, à chaque instant k , la perturbation peut s'écrire

$$F_{e,p,k} = A_{p,k} \cos(2k\pi h/T_p + \phi_{p,k}), \quad (4.37)$$

où ϕ_p est la phase du signal de perturbation. $F_{e,p,k}$ peut aussi être décomposée en deux signaux en quadrature de phase sous la forme

$$F_{e,p,k} = \theta_{c,k} \cos(\alpha_k) - \theta_{s,k} \sin(\alpha_k) \quad (4.38)$$

avec

$$\alpha_k \triangleq 2k\pi h/T_p, \quad (4.39)$$

$$\theta_{c,k} = A_{p,k} \cos(\phi_{p,k}) \quad (4.40)$$

et

$$\theta_{s,k} = A_{p,k} \sin(\phi_{p,k}). \quad (4.41)$$

Une estimation de la perturbation $F_{e,p}$ est donnée par

$$\hat{F}_{e,p,k} = \hat{\theta}_{c,k} \cos(\alpha_k) - \hat{\theta}_{s,k} \sin(\alpha_k), \quad (4.42)$$

où $\hat{\theta}_{c,k}$ et $\hat{\theta}_{s,k}$ sont des estimations respectives de $\theta_{c,k}$ et $\theta_{s,k}$. En retranchant l'estimation $\hat{F}_{e,p,k}$ de la mesure $F_{e,k}$, il est possible d'obtenir une estimation de l'effort initial $F_{e,m,k}$ non perturbé, notée $\hat{F}_{e,m,k}$ et donnée par

$$\hat{F}_{e,m,k} = F_{e,k} - \hat{F}_{e,p,k} = F_{e,m,k} + (F_{e,p,k} - \hat{F}_{e,p,k}), \quad (4.43)$$

L'algorithme d'identification harmonique basé sur une méthode du gradient est ajusté afin que la quantité $F_{e,p,k} - \hat{F}_{e,p,k}$ converge vers zéro et donc que $\hat{F}_{e,m,k}$ tende vers $F_{e,m,k}$. Il procède selon la loi d'adaptation donnée par

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta}_{c,k} \\ \hat{\theta}_{s,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{c,k-1} \\ \hat{\theta}_{s,k-1} \end{bmatrix} - gh \begin{bmatrix} -\cos(\alpha_k) \\ \sin(\alpha_k) \end{bmatrix} \hat{F}_{e,m,k}, \quad (4.44)$$

dans laquelle g est un gain d'adaptation positif. Comme $\hat{\theta}_{c,k}$ et $\hat{\theta}_{s,k}$ dépendent à la fois de $A_{p,k}$ et de $\phi_{p,k}$, le filtre s'adapte en ligne aux variations de phase et d'amplitude de la perturbation.

Pour évaluer les performances d'estimation de ce filtre, nous l'avons appliqué en ligne pour l'estimation des perturbations en effort mesurés lors de l'expérience précédente (cf. Figure 4.14(b)). Les résultats d'estimation sont présentés sur la Figure 4.16 où sont tracés les efforts mesurés F_e (a), les perturbations estimées en effort $\hat{F}_{e,p}$ (b) et les efforts estimés de sortie du système $\hat{F}_{e,m}$ (c). On constate qu'après $\simeq 5$ [s], l'effort estimé de sortie $\hat{F}_{e,m}$ est uniquement formé de la composante continue (très proche de l'effort désiré F_d). Ceci prouve que le filtre fournit une bonne estimation de la perturbation en effort $\hat{F}_{e,p}$. Étant établi pour identifier les perturbations périodiques de période $T_p = 1$ [s], le filtre ne perçoit pas les autres variations des efforts mesurés F_e notamment celles apparues lors du changement de consigne (à $t \simeq 13$ [s]). Dès l'arrêt du simulateur et la stabilisation des efforts F_e , le filtre fournit une estimation nulle des perturbations. La vitesse de convergence dépend du gain d'adaptation g qui, pour cette expérience, a été choisi égal à 2. Ce choix assure la stabilité et la vitesse de convergence de l'algorithme d'estimation des perturbations $F_{e,p}$. Ces dernières seront utilisées pour générer une séquence de commande $u_{c,k}$ visant à les compenser. Cette stratégie de compensation est développée dans le paragraphe suivant.

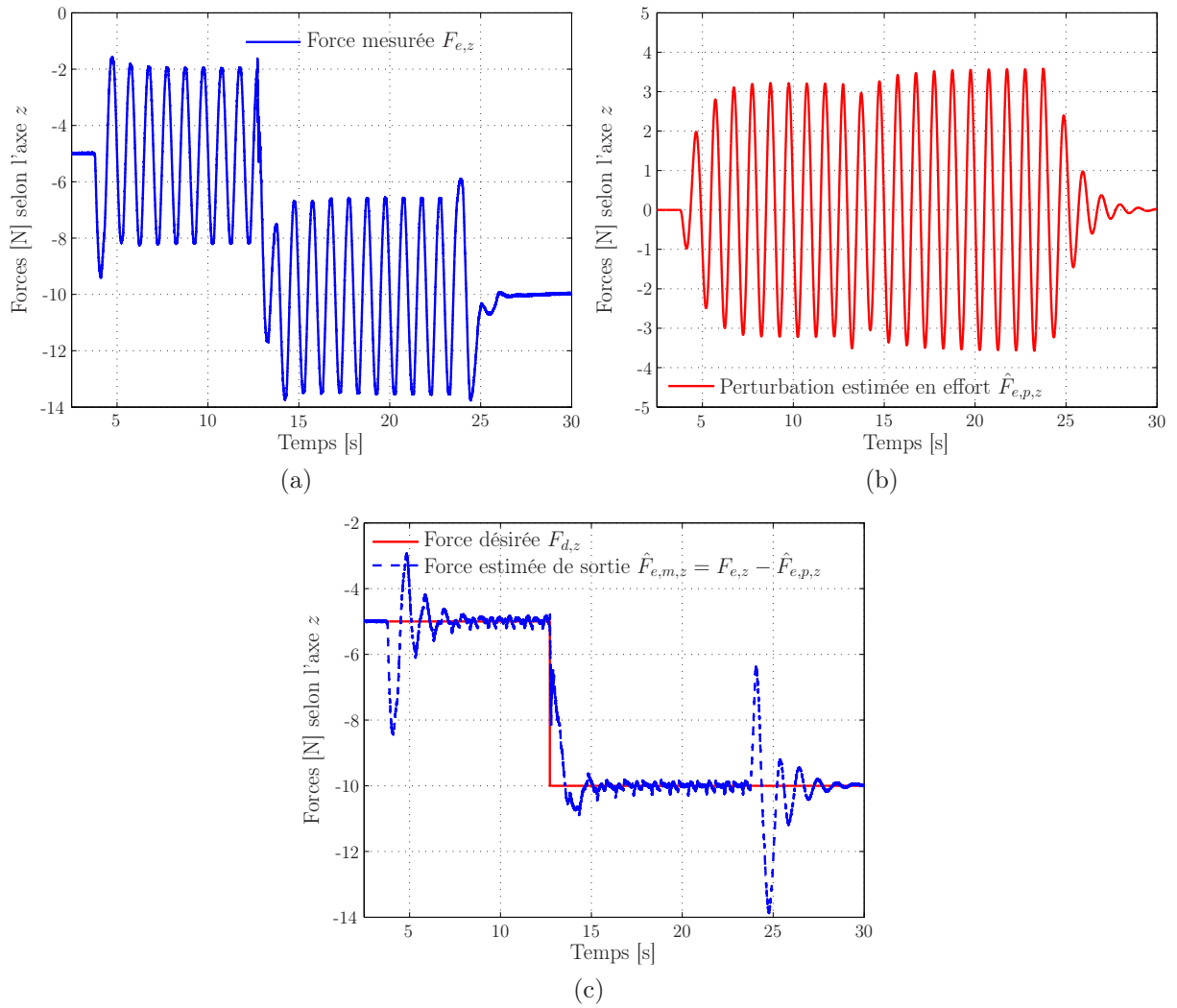


Figure 4.16 - Estimation des perturbations périodiques en effort par l'algorithme d'identification harmonique : (a) effort mesuré $F_{e,z}$, (b) perturbation estimée en effort $\hat{F}_{e,p,z}$, (c) extraction de la perturbation estimée $\hat{F}_{e,p,z}$ de l'effort mesuré $F_{e,z}$ ($\hat{F}_{e,m,z} = F_{e,z} - \hat{F}_{e,p,z}$).

4.3.3.2 Compensation des perturbations

Les efforts F_e appliqués par le robot **D2M2** sur son environnement sont reliés à l'entrée de commande u par la fonction de transfert

$$G(s) \approx \frac{K_s e^{-sT_d}}{s(s + K_2)}. \quad (4.45)$$

En considérant un retard T_d faible et une raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e = K_s$, une première approche de compensation des perturbations en effort de sortie $F_{e,p}$ est d'appliquer une commande $u_{c,k}$ donnée par

$$u_{c,k} = -\frac{1}{\hat{K}_{s,c}^e} (K_2 \hat{f}_{e,p,k}^1 + \hat{f}_{e,p,k}^2), \quad (4.46)$$

dans laquelle $\hat{f}_{e,p,k}^1$ et $\hat{f}_{e,p,k}^2$ sont respectivement les dérivées première et seconde de la perturbation estimée en effort $\hat{F}_{e,p}$ à l'instant k .

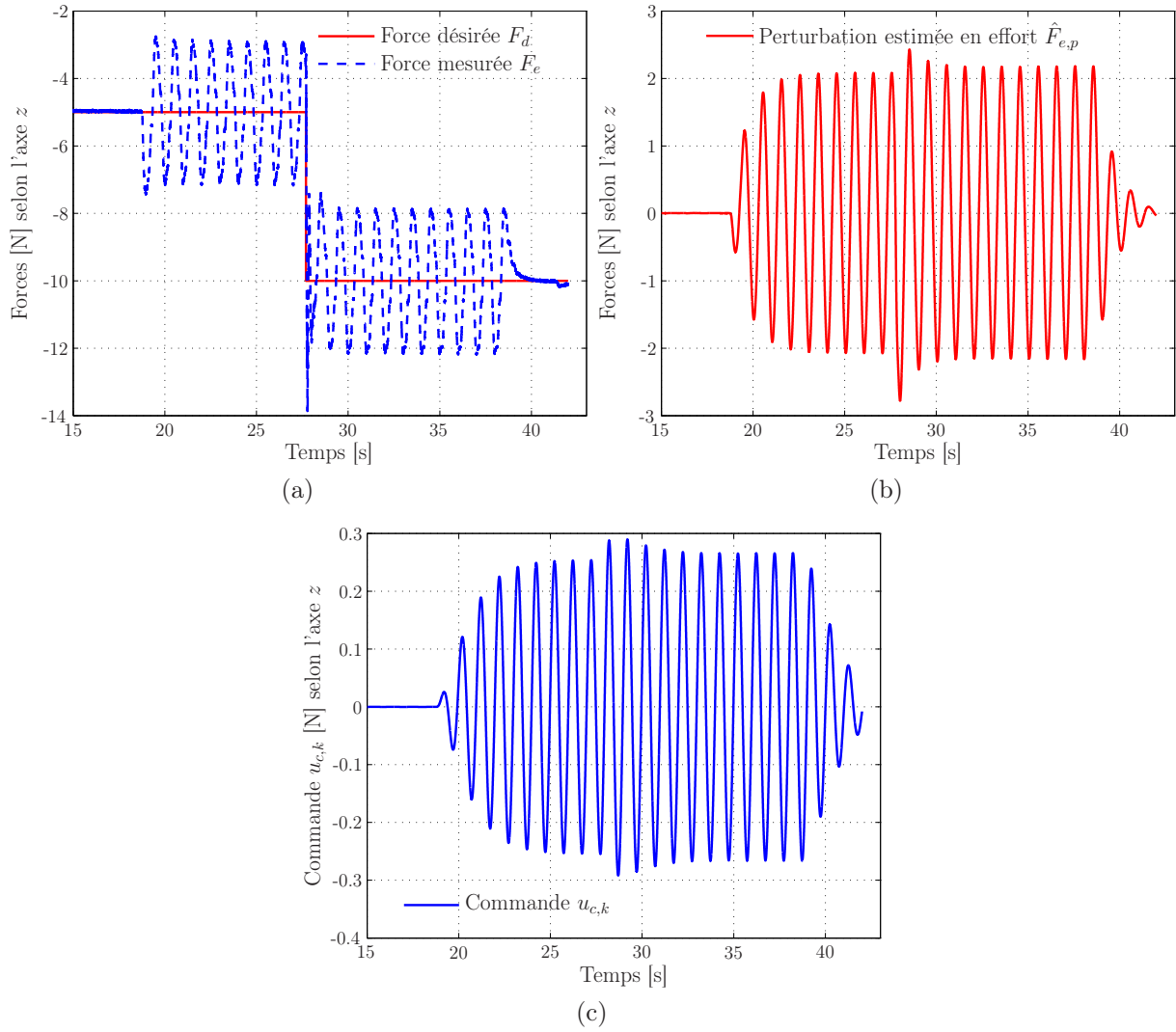


Figure 4.17 - *Rejet de perturbations périodiques en effort selon l'axe z du repère R_0 par une première approche de compensation : (a) efforts désiré F_d et mesuré F_e , (b) perturbation estimée en effort $\hat{F}_{e,p}$ et (c) commande $u_{c,k}$ dédiée à la compensation des perturbations.*

Nous avons repris l'expérience réalisée précédemment (cf. §4.3.3) mais en appliquant la commande $u_{c,k}$ donnée par la relation (4.46) pour la compensation des perturbations en effort $F_{e,p}$. Les résultats sont donnés sur la Figure 4.17 montrant une atténuation partielle des perturbations $F_{e,p}$ qui varient entre ± 2 [N] (Figure 4.17(a)). En effet, la commande $u_{c,k}$ donnée par (4.46) dépend uniquement des perturbations estimées $\hat{F}_{e,p}$. Après une faible compensation, ces estimations seront atténuées faisant aussi atténuer l'apport de la commande $u_{c,k}$, qui au final ne permet qu'un rejet partiel des perturbations $F_{e,p}$.

Une solution à ce problème peut être apportée en considérant que la compensation des perturbations $F_{e,p}$ génère des perturbations $X_{s,p}$ en position. Ainsi les perturbations estimées utilisées dans la synthèse de la commande $u_{c,k}$ (4.46) peuvent être approchées par

$$\hat{F}_{e,p,k} - \hat{K}_{s,c}^e \hat{X}_{s,p,k}, \quad (4.47)$$

où $\hat{X}_{s,p,k}$ est une estimation des perturbations périodiques en position qui ont contribué

au rejet des perturbations en effort $F_{e,p}$.

Ces estimations peuvent être fournies par l'algorithme d'identification harmonique présenté précédemment en considérant que la position mesurée X_s du robot **D2M2** est

$$X_{s,k} = X_{s,m,k} + X_{s,p,k}, \quad (4.48)$$

où $X_{s,m,k}$ est la position liée à l'application d'un effort désiré. Cependant, pour prendre en compte les erreurs de modélisation évoquées au §3.2.3 du Chapitre 3, les perturbations en position $X_{s,p}$ sont estimées à partir du modèle en position du robot et de l'entrée $u_{c,k}$. Ce modèle est donné par la fonction de transfert continue

$$G_p(s) \approx \frac{e^{-sT_d}}{s(s + K_2)} \quad (4.49)$$

qui, en considérant un retard T_d faible et après échantillonnage à une période h , fournit l'équation de récurrence qui relie l'entrée $u_{c,k}$ à la sortie en position $X_{s,p,k}$. Cette relation est donnée par

$$X_{s,p,k} = -a_1 X_{s,p,k-1} - a_2 X_{s,p,k-2} + b_1 u_{c,k-1} + b_2 u_{c,k-2} \quad (4.50)$$

avec

$$\begin{aligned} a_1 &= -(1 + e^{-hK_2}) & , & \quad a_2 = e^{-hK_2}, \\ b_1 &= \frac{1}{K_2^2}(-1 + hK_2 + e^{-hK_2}) & \text{et} & \quad b_2 = \frac{1}{K_2^2}(1 - hK_2 e^{-hK_2} - e^{-hK_2}). \end{aligned} \quad (4.51)$$

La stratégie de commande pour la compensation des perturbations en effort est alors modifiée et devient

$$u_{c,k} = -\frac{1}{\hat{K}_{s,c}^e} (K_2(\hat{f}_{e,p,k}^1 - \hat{K}_{s,c}^e \hat{x}_{s,p,k}^1) + (\hat{f}_{e,p,k}^2 - \hat{K}_{s,c}^e \hat{x}_{s,p,k}^2)), \quad (4.52)$$

où $\hat{f}_{e,p,k}^1$, $\hat{f}_{e,p,k}^2$ et $\hat{x}_{s,p,k}^1$, $\hat{x}_{s,p,k}^2$ sont respectivement les dérivées premières et secondes des perturbations estimées en effort $\hat{F}_{e,p,k}$ et en position $\hat{X}_{s,p,k}$. Ainsi, lorsqu'une compensation totale des perturbations en effort sera établie ($\hat{f}_{e,p,k}^1 = \hat{f}_{e,p,k}^2 = 0$), la commande pourra toujours agir sous l'effet du modèle de déplacement du robot **D2M2** donné par $\hat{x}_{s,p,k}^1$ et $\hat{x}_{s,p,k}^2$.

4.3.3.3 Synthèse de la commande référencée modèle

Le schéma de commande en effort incluant la stratégie de compensation des perturbations est illustré sur la Figure 4.18. Pratiquement, la dérivée première $\hat{f}_{e,p,k}^1$ (et $\hat{x}_{s,p,k}^1$) est obtenue par une dérivation numérique du premier ordre de $\hat{F}_{e,p,k}$ (et de $\hat{X}_{s,p,k}$) suivie d'un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est supérieure à $1/T_p$. Puisque $\hat{F}_{e,p,k}$ (et $\hat{X}_{s,p,k}$) est sinusoïdale de pulsation $w_p = 2\pi/T_p$, la dérivée seconde est donnée par $\hat{f}_{e,p,k}^2 = -w_p^2 \hat{F}_{e,p,k}$ (et $\hat{x}_{s,p,k}^2 = -w_p^2 \hat{X}_{s,p,k}$).

4.3.4 Analyses expérimentales

Pour valider la stratégie de compensation des perturbations en efforts sur la plate-forme robotique, nous avons repris l'expérience présentée dans le §4.3.2. L'expérience débute avec

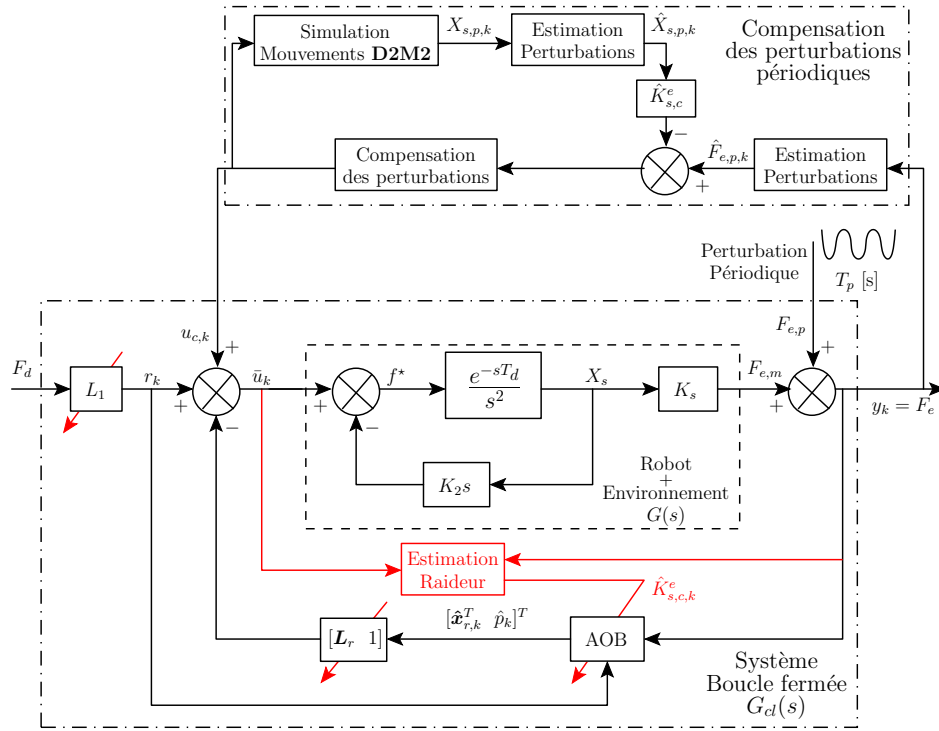


Figure 4.18 - Architecture de commande en effort intégrant la commande par estimation et retour d'état, l'estimation en ligne de la raideur de l'environnement et l'estimation et la compensation de perturbations périodiques en effort.

le robot arrêté. Nous imposons alors un effort désiré $F_d = -5$ [N] selon la direction z du repère R_0 . Il se déplace alors jusqu'au contact avec l'objet en mousse placé au niveau de l'organe terminal du simulateur de mouvement. Au moment du contact, l'estimateur de raideur fournit une raideur nominale estimée $\hat{K}_{s,c}^e$ (Figure 4.19(a)). Une quinzaine de secondes plus tard, nous imposons au simulateur de mouvement un déplacement sinusoïdal Z^s de période $T_p = 1$ [s] (1 [Hz]) et d'amplitude $\simeq 10$ [mm] (cf. Figure 4.19(b)).

Les déplacements du simulateur, induisent des perturbations dans les efforts mesurés F_e illustrés sur la Figure 4.20(a). La stratégie de commande en effort tente alors de les compenser en appliquant la commande par retour d'état $u_k = L_1 F_d - [\mathbf{L}_r \ 1] [\hat{x}_{r,k}^T \hat{p}_k]^T$ (Figure 4.20(c)). Cette commande ne permet qu'une faible atténuation des perturbations en effort. Le déplacement correspondant du robot est donné sur la Figure 4.20(b).

Dès l'apparition des perturbations en effort, l'algorithme d'identification harmonique estime $\hat{F}_{e,p}$ (Figure 4.21(a)). La commande $u_{c,k}$ générée pour la compensation des perturbations est présentée sur la Figure 4.20(c). Elle permet à $t \simeq 23$ [s] ($\simeq 8$ [s] après l'apparition des perturbations) d'atténuer les perturbations en effort. Les efforts mesurés F_e présentent alors une perturbation variant entre ± 0.4 [N]. Cette compensation a été maintenue jusqu'à la fin de l'expérience grâce à l'application des perturbations estimées en position $\hat{X}_{s,p}$ illustrées sur la Figure 4.21(b).

Une fois les perturbations en effort compensées, l'action de la commande par retour d'état $u_k = L_1 F_d - [\mathbf{L}_r \ 1] [\hat{x}_{r,k}^T \hat{p}_k]^T$ devient faible (cf. Figure 4.20(c) à partir de $t \simeq 23$ [s]). Elle ne réagit que lors du passage de l'effort désirée de -5 à -10 [N]. Le robot applique alors un effort $F_e = F_d = -10$ [N]. Les perturbations en effort $F_{e,p}$ restent atténuées.

À l'instant $t = 45$ [s], le simulateur est arrêté. Des perturbations sinusoïdales apparaissent au niveau des effort mesurés F_e . Elles sont dues à la stratégie de compensation et

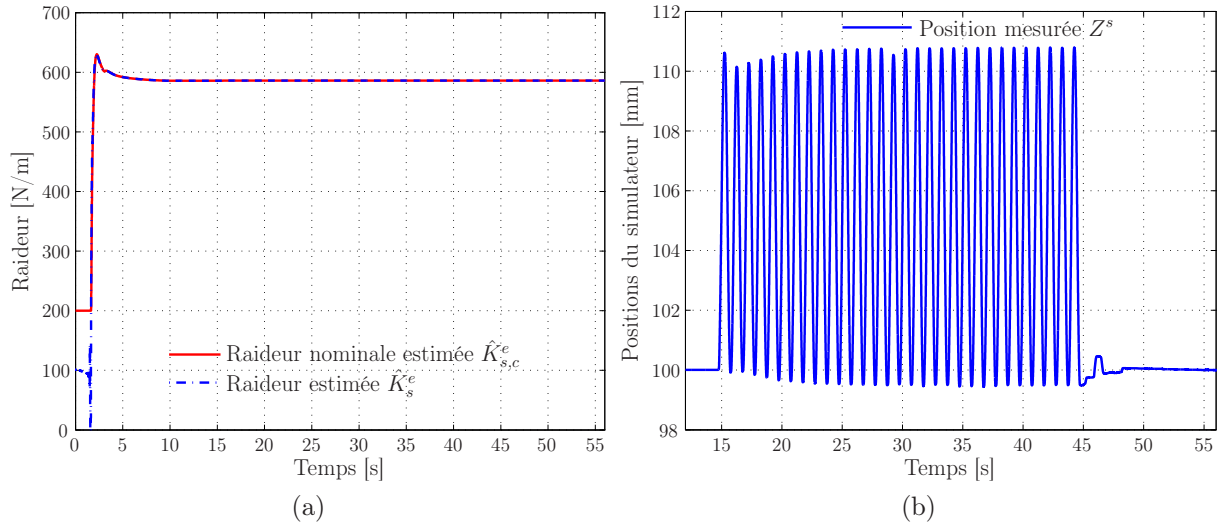


Figure 4.19 - *Raideurs estimées et déplacements du simulateur de mouvement lors d'une compensation de perturbations périodiques en effort : (a) raideurs estimées $\hat{K}_s^e$ et nominale $\hat{K}_{s,c}^e$ et (b) position Z^s du simulateur de mouvement.*

à l'algorithme d'identification harmonique. Ce dernier met quelques secondes avant que les estimations $\hat{F}_{e,p}$ et $\hat{X}_{s,p}$ ne convergent vers une valeur nulle. Néanmoins ces perturbations sont atténuées après une dizaine de secondes et l'effort appliqué F_e converge vers l'effort désiré $F_d = -10$ [N]. La rapidité de convergence de l'algorithme d'identification peut être améliorée en augmentant le gain d'adaptation g qui, pour cette expérience, a été choisi égal à 2. Cependant une grande valeur de g peut générer un comportement instable des variables estimées au départ de l'estimation. Un compromis entre rapidité et stabilité est alors à faire.

4.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre nos contributions pour l'assistance robotisée dans le contexte de la chirurgie mini-invasive à cœur battant.

La première contribution concerne l'intégration, dans la stratégie de télé-opération avec retour d'effort, de la contrainte du passage par le trocart. La tâche de télé-opération avec retour d'effort a été réalisée en considérant la stratégie de commande en effort par observation et retour d'état développée dans le Chapitre 2. Quant à la contrainte du passage par le trocart, elle a été respectée en réalisant la commande en position d'un robot virtuel pour atteindre une position fixe donnée par celle du trocart. Nous avons à nouveau exploité le principe de l'observateur actif et de la commande par retour d'état. L'application du principe du découplage tâche-posture a finalement permis la réalisation de la tâche de télé-opération tout en imposant le passage de l'instrument du robot esclave par un point fixe situé dans son espace de travail. Ces stratégies de télé-opération et de commande ont permis le respect de la contrainte avec une distance entre l'instrument et le trocart inférieure à 8 [mm].

Nous avons ensuite proposé une méthodologie pour la compensation des mouvements physiologiques. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux perturbations induites par un environnement en mouvement dans les efforts appliqués par l'instrument. La stratégie de commande développée suppose des perturbations périodiques et de période

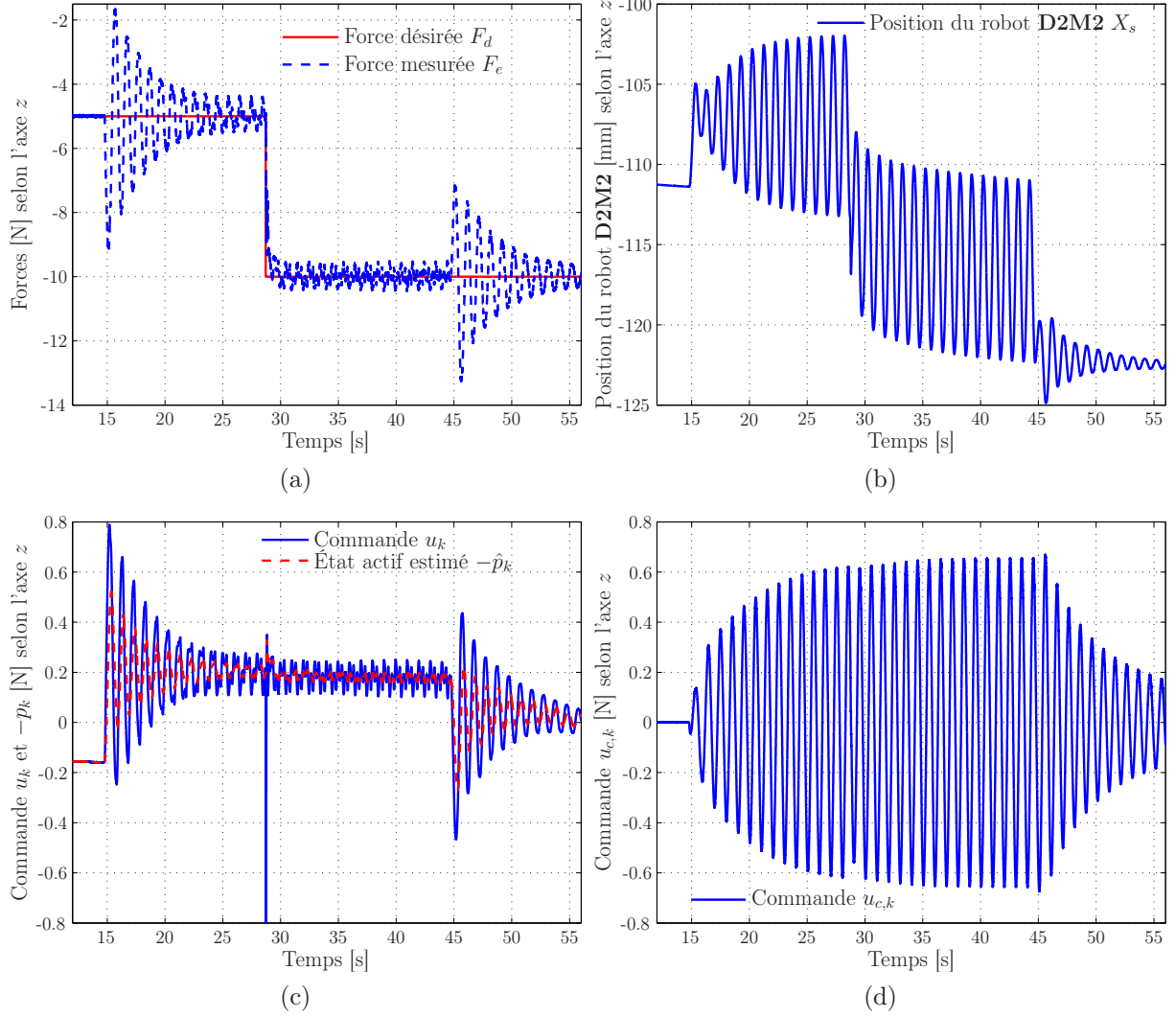


Figure 4.20 - Rejet de perturbations périodiques en effort par l'architecture de commande selon l'axe z du repère R_0 : (a) efforts désiré F_d et mesuré F_e , (b) position X_s du robot **D2M2**, (c) état actif estimé $-\hat{p}_k$ et commande par retour d'état u_k et (d) commande $u_{c,k}$ générée par la stratégie de compensation des perturbations en effort.

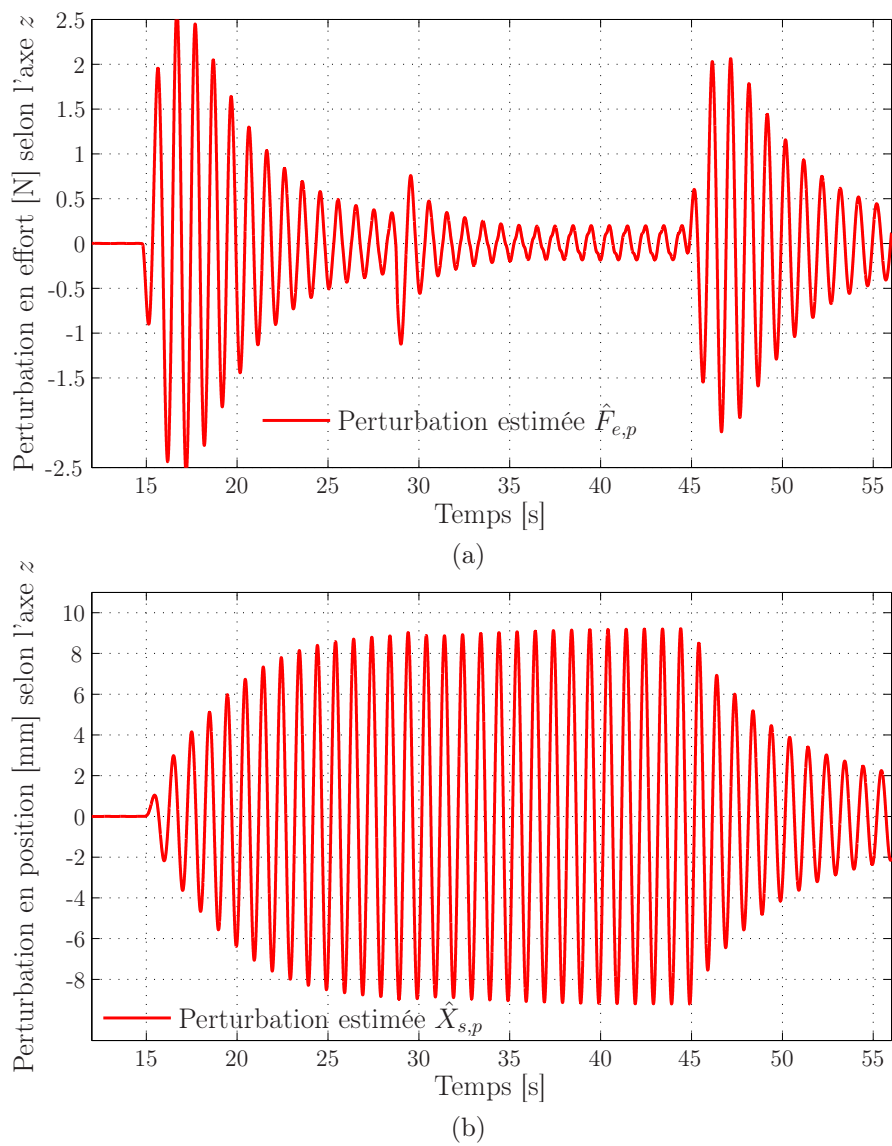


Figure 4.21 - *Perturbations estimées lors d'une compensation de perturbations en efforts selon l'axe z du repère R_0 : (a) en effort $\hat{F}_{e,p}$ et (b) en position $\hat{X}_{s,p}$.*

connue. Cette stratégie de compensation a d'abord été établie en réalisant l'estimation des perturbations à partir des efforts mesurés et appliqués par l'instrument du robot sur l'environnement en mouvement. Les perturbations estimées ont ensuite été utilisées dans une commande de type référencée modèle. La contribution porte sur la reconstruction des perturbations extérieures réellement appliquées à la sortie du système. Nous avons ainsi considéré que la compensation des perturbations en effort génère également des perturbations en position. Ces dernières ont alors été reconstruites et utilisées à l'entrée d'une commande référencée modèle. Afin de réaliser le suivi des mouvements tout en étant capable d'appliquer des efforts désirés, la stratégie de compensation a été superposée à la commande en effort développée dans le Chapitre 2. L'évaluation expérimentale a montré l'efficacité de cette approche. Les efforts désirés ont pu être appliqués et les perturbations périodiques qui initialement variaient entre ± 3 [N] ont été atténuées à ± 0.4 [N].

Conclusion Générale

Ce manuscrit a présenté les travaux réalisés dans le contexte de l'assistance robotique pour la chirurgie mini-invasive télé-opérée. Les développements proposés concernent principalement la restitution des efforts au chirurgien qui télé-opère des instruments chirurgicaux à distance.

Nous avons ainsi proposé un schéma de télé-opération avec retour d'effort basé sur une architecture position - position avec une commande en effort pour un robot esclave en contact avec son environnement. Cette structure tire profit de l'architecture position - position tout en permettant à l'opérateur de contrôler les efforts appliqués par le robot sur les tissus. L'approche de commande en effort repose sur le découplage non linéaire du système esclave, la conception d'un observateur d'état et la commande par retour d'état. Cette dernière permet d'imposer une dynamique et un comportement désiré du système en boucle fermée. Le reconstruteur d'état est un observateur actif de l'état qui inclut une estimation des erreurs de modélisation du système esclave. La prise en compte de ces erreurs dans la commande par retour d'état permet de minimiser leurs effets et donc de garantir les performances désirées en boucle fermée. Les résultats expérimentaux obtenus sur la plate-forme robotique **D2M2** montrent l'efficacité de l'architecture de télé-opération avec retour d'effort pour des déplacements en espace libre et pour des interactions avec un environnement mou. Les sensations en effort perçues par l'opérateur le renseignent sur le comportement du système esclave.

L'architecture de commande en effort est définie en considérant un modèle de l'environnement. Sa stabilité est fortement dépendante de la connaissance des caractéristiques de l'environnement. Nous avons alors développé un filtre de Kalman étendu estimer la raideur de l'environnement et adapter en ligne la loi de commande en effort. Contrairement aux approches usuelles, la stratégie d'estimation proposée ne nécessite pas la connaissance de la position de repos, en général difficile à déterminer en chirurgie mini-invasive, de l'environnement. De plus, l'estimateur est conçu en distinguant l'erreur d'estimation de la raideur des erreurs de modélisation du robot esclave. L'adaptation de la loi de commande en effort permet une télé-opération en espace libre ainsi que des interactions avec des environnements de rigidité différente et élevée.

La stabilité et la transparence du schéma de télé-opération représentent respectivement une contrainte de fonctionnement indispensable et un critère de qualité permettant à l'opérateur de distinguer la variabilité de la nature de l'environnement distant. Le schéma de télé-opération a alors été qualifié par une analyse de stabilité et de transparence. Nous avons d'abord analysé la transparence de l'architecture de télé-opération qui est fortement dépendante de la raideur de l'environnement et des paramètres de télé-opération. Nous avons donc proposé une loi d'adaptation de ces paramètres suivant la raideur estimée de l'environnement afin d'imposer une transparence désirée tout en assurant des marges de stabilité satisfaisantes du système de télé-opération. Cette dernière a été établie en séparant l'action volontaire et involontaire de l'opérateur. La validation expérimentale sur la

plate-forme du **D2M2** montre les performances de l'approche proposée. Lors d'une interaction avec des tissus *ex-vivo*, l'opérateur est capable de distinguer entre des tissus mous et des tissus rigides. Une expérimentation mettant en œuvre une insertion d'aiguille télé-opérée montre une réelle capacité de l'opérateur à distinguer et à contrôler les différentes phases de pénétration.

L'assistance au geste chirurgical mini-invasif soulève le problème lié aux contraintes engendrées par cette pratique. Nous nous sommes intéressés à deux de ces contraintes que sont le respect du passage des instruments par le trocart et la compensation des mouvements physiologique du cœur lors d'une intervention chirurgicale cardiaque.

Pour respecter la contrainte du passage par le trocart, nous avons proposé une commande en position d'un robot virtuel dont la position de l'effecteur est donnée par la projection du trocart sur l'instrument du robot esclave. La stratégie de commande du robot virtuel reprend les mêmes principes de commande développés en effort en se basant sur un observateur actif de l'état et une commande par retour d'état estimé. Le découplage tâche-posture du robot esclave permet ensuite la télé-opération avec retour d'effort et le respect du passage par un point fixe. Les évaluations expérimentales montrent la pertinence de notre approche.

Enfin dans le contexte de la chirurgie mini-invasive à cœur battant, nous avons présenté les premiers résultats pour la compensation des mouvements physiologiques de l'organe. Ces travaux font partie d'un projet à long terme dont l'objectif final est d'offrir une stabilisation virtuelle du cœur. Nous avons abordé le problème comme un problème de compensation de perturbations périodiques dans les efforts appliqués par l'instrument sur l'organe en mouvement. Connaissant leur période, les perturbations sont identifiées et extraites des mesures en effort. Les estimations obtenues sont ensuite utilisées dans une stratégie de commande référencée modèle et superposée à la stratégie de commande en effort permettant la réalisation des gestes de l'opérateur. La compensation est réalisée en considérant que l'atténuation des perturbations en effort génère un déplacement désiré du robot esclave. Ce déplacement est alors estimé et utilisé à l'entrée de la stratégie de commande dédiée à la compensation des perturbations en effort. La validation expérimentale réalisée sur la plate-forme **D2M2** et un simulateur de mouvements périodiques montre les performances de cette approche.

Il est évident que les travaux présentés dans ce manuscrit ne représente qu'une étape dans un projet à très long terme que représente la télé-manipulation avec retour d'effort pour la chirurgie mini-invasive. Ceci étant, les résultats obtenus ouvrent des perspectives importantes pour faire bénéficier à cette pratique de la chirurgie de toutes les capacités de la robotique et des systèmes de télé-opération à retour d'effort. Parmi ces perspectives, nous pouvons mentionner :

- † L'architecture de télé-opération avec retour d'effort a été validée sur la plate-forme expérimentale en considérant une télé-opération en espace libre selon les trois directions de l'espace et des interactions avec un environnement selon une seule direction. L'extension de l'architecture pour des interactions suivant les trois directions ne devrait pas poser de problème particulier. La mise en œuvre de la stratégie de commande doit être identique pour les deux autres directions. Cependant, il serait intéressant de considérer une application d'effort suivant une direction (z par exemple) avec un déplacement selon une autre (x par exemple). Dans ce cas, un modèle de frottement devrait être considéré dans la stratégie de commande de la direction du déplacement (x). Ceci permettra une meilleure transparence du schéma de télé-opération, mais signifiera une architecture de commande différente pour chacune des directions.

-
- † Qu'elle concerne la télé-opération en espace libre ou l'interaction avec des tissus *ex-vivo*, l'évaluation du schéma de télé-opération avec retour d'effort a été réalisée expérimentalement. Les résultats obtenus pour les deux phases de télé-opération semblent satisfaisants en terme de suivi de trajectoire et de perception des efforts. Cependant, cette architecture devra encore être validée par des chirurgiens en considérant des tissus *in-vivo*. Ces chirurgien possèdent une meilleure connaissance des contacts avec les tissus et leur avis sera important pour régler la transparence désirée du schéma de télé-opération.
 - † L'insertion d'une aiguille télé-opérée a été réalisée dans un tissu *ex-vivo* dont la peau est l'élément le plus rigide. Des essais considérant un contact direct dans des tissus *in-vivo* mettant en évidence des efforts beaucoup moins importants, doivent être réalisés pour valider l'approche proposée. De plus, cette expérience d'insertion d'aiguille a clairement montré que la raideur de l'environnement peut varier. L'ajout d'un bruit sur le modèle du paramètre à estimer dans la conception du filtre de Kalman pourrait permettre de prendre en compte des variations lentes de la raideur de l'environnement.
 - † La prise en compte du passage par un point fixe doit être évaluée *in-vivo* en considérant un réel passage par un trocart. La considération de cette contrainte dans la stratégie de commande du robot esclave est une solution qui a pour objectif de minimiser les efforts appliqués par l'instrument sur le trocart. Un capteur d'effort adéquat (ou un trocart muni d'un capteur d'effort [Zemiti, 2005]) doit alors être utilisé dans un premier temps pour mesurer ces efforts et ensuite pour réaliser une stratégie de commande visant à les minimiser. La commande en position du robot virtuel devient alors une commande en effort imposant des efforts tangentiels nuls sur le trocart. La même stratégie d'estimation et de commande par retour d'état pourrait être utilisée.
 - † Dans le contexte de la compensation des mouvements physiologiques du cœur, nous avons considéré uniquement la commande en effort du robot esclave. Les résultats obtenus ont montré une bonne compensation des mouvements avec l'application des efforts désirés de l'opérateur. Cette stratégie de compensation doit être validée en considérant tout le schéma de télé-opération avec retour d'effort. Cependant, la compensation des perturbations génère le déplacement du robot esclave. L'architecture de télé-opération position - position risque alors de transmettre un effort de retour perturbé à l'opérateur. Une solution à ce problème peut être apportée en appliquant l'algorithme d'identification harmonique à la position du robot esclave. Les perturbations estimées seront alors utilisées afin de stabiliser le retour d'effort. Il serait enfin intéressant de valider cette stratégie de compensation *in-vivo* sur un cœur en mouvement.

Publications

Conférences internationales

1. W. ZARRAD AND P. POIGNET AND R. CORTESÃO AND O. COMPANY, Stability and Transparency Analysis of a Haptic Feedback Controller for Medical Applications, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Decision and Control (CDC'07)*, La Nouvelle-Orléans, Louisiane, USA, Décembre 2007.
2. W. ZARRAD AND P. POIGNET AND R. CORTESÃO AND O. COMPANY, Towards Teleoperated Needle Insertion with Haptic Feedback Controller, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'07)*, San Diego, California, USA, Octobre 2007.
3. W. ZARRAD AND P. POIGNET AND R. CORTESÃO AND O. COMPANY, Robotic-Assisted Surgery Through Haptic Feedback Teleoperation Controller, *Proc. of Surgetica : Computer-Aided Medical Interventions : Tools and Applications (Surgetica'07)*, Chambéry, France, Septembre 2007
4. W. ZARRAD AND P. POIGNET AND R. CORTESÃO AND O. COMPANY, Haptic Feedback Control in Medical Robotics through Stiffness Estimation with Extended Kalman Filter, *Proc. of the Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR'07)*, Jeju, Corée du Sud, Août 2007.
5. R. CORTESÃO AND W. ZARRAD AND P. POIGNET AND O. COMPANY AND E. DOMBRE, Haptic Control Design for Robotic-Assisted Minimally Invasive Surgery, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'06)*, Beijing, China, Octobre 2006.

Bibliographie

- [Aiono *et al.*, 2002] AIONO, S., GILBERT, J. M., SOIN, B., FINLAY, P. A. et GORDAN, A. (2002). Controlled trial of the introduction of a robotic camera assistant (EndoAssist) for laparoscopic cholecystectomy. *Surgical Endoscopy*, 16(9):1267–1270.
- [Allaf *et al.*, 1998] ALLAF, M. E., JACKMAN, S. V., SCHULAM, P. G., GADEDDU, J. A., LEE, B. R., MOORE, R. G. et KAVOUSSI, L. R. (1998). Laparoscopic visual field : Voice versus foot pedal interfaces for control of the aesop robot. *Surgical Endoscopy*, 12(12):1415–1418.
- [Anderson et Spong, 1989] ANDERSON, R. J. et SPONG, M. W. (1989). Bilateral control of teleoperators with time delay. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 34(5):494–501.
- [Arata *et al.*, 2005] ARATA, J., MITSUISHI, M., WARISAWA, S. et HASHIZUME, M. (2005). Development of dexterous minimally-invasive surgical system with augmented force feedback capability. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'05)*, pages 3738–3743, Alberta, Canada.
- [Arata *et al.*, 2006] ARATA, J., TAKAHASHI, H., PITAKWATCHARA, P., WARISAWA, S., KONISHI, K., TANOUE, K., LEIRI, S., SHIMIZU, S., NAKASHIMA, N., OKAMURA, K., KIM, Y. S., KIM, S. M., HAHM, J.-S., HASHIZUME, M. et MITSUISHI, M. (2006). A remote surgery experiment between japan-korea using the minimally invasive surgical system. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'06)*, pages 257–262, Orlando, Florida, USA.
- [Arcara, 2001] ARCARA, P. (2001). *Control of Haptic and Robotic Telemanipulation Systems*. Phd thesis, Università di Bologna, Bologna, Italy.
- [Arcara et Melchiorri, 2002] ARCARA, P. et MELCHIORRI, C. (2002). Control schemes for teleoperation with time delay : A comparative study. *Robotics and Autonomous Systems*, 38(1):49–64.
- [Barbe *et al.*, 1996] BARBE, C., CARRAT, L., CHAVANON, O. et TROCCAZ, J. (1996). Computer assisted pericardic surgery. *Proc. of the Int. Conf. on Computer Assisted Radiology (CAR'96)*, pages 781–786, Berlin, Germany.
- [Barbé *et al.*, 2006] BARBÉ, L., BAYLE, B., de MATHELIN, M. et GANGI, A. (2006). On-line robust model estimation and haptic clues detection during in vivo needle insertions. *The First IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pages 341–346, Pisa, Italy.
- [Barbé *et al.*, 2007a] BARBÉ, L., BAYLE, B., de MATHELIN, M. et GANGI, A. (2007a). In vivo model estimation and haptic characterization of needle insertions. *The International Journal of Robotics Research*. à paraître.
- [Barbé *et al.*, 2007b] BARBÉ, L., BAYLE, B., de MATHELIN, M. et GANGI, A. (2007b). Needle insertions modeling : identifiability and limitations. *Biomedical Signal Processing and Control*. à paraître.

- [Bebek et Çavuşoğlu, 2006] BEBEK, O. et ÇAVUŞOĞLU, M. C. (2006). Predictive control algorithms using biological signals for active relative motion canceling in robotic assisted heart surgery. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'06)*, pages 237–244, Orlando, Florida, USA.
- [Berkelman *et al.*, 2003a] BERKELMAN, P., CINQUIN, P., BOIDARD, E., TROCCAZ, J., LETOUBLON, C. et AYOUBI, J. (2003a). Design, control and testing of a novel compact laparoscopic endoscope manipulator. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of System and Control Engineering*, 217:329–341.
- [Berkelman *et al.*, 2002] BERKELMAN, P., CINQUIN, P., TROCCAZ, J., AYOUBI, J., LETOUBLON, C. et BOUCHARD, F. (2002). A compact, compliant laparoscopic endoscope manipulator. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'02)*, volume 2, pages 1870–1875, Washington. DC, USA.
- [Berkelman *et al.*, 2003b] BERKELMAN, P. J., WHITCOMB, L. L., TAYLOR, R. H. et JENSEN, P. (2003b). A miniature microsurgical instrument tip force sensor for enhanced force feedback during robot-assisted manipulation. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19(5):917–922.
- [Bodson *et al.*, 1994] BODSON, M., SACKS, A. et KHOSLA, P. (1994). Harmonic generation in adaptive feedforward cancellation schemes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(9):1939–1944.
- [Borst *et al.*, 1996] BORST, C., JANSEN, E. W., TULLEKEN, C. A., GRUNDEMAN, P. F., BECK, H. J. M., DONGEN, J. W. V., HODDE, K. C. et BREDEE, J. J. (1996). Coronary artery bypass grafting without cardiopulmonary bypass and without interruption of native coronary flow using a novel anastomosis site restraining device ("Octopus"). *Journal of the American College of Cardiology*, 27:1356–1364.
- [Bourgeois et Decouvelaere, 2004] BOURGEOIS, L. et DECOUVELAERE, M. (2004). Chirurgie assistée par ordinateur : les télémanipulateurs chirurgicaux. *Innovation et Technologie en Biologie et Médecine ITBM-RBM News*, 25(3):14–27.
- [Bruzzzone *et al.*, 2002] BRUZZONE, G., BONO, R., BRUZZONE, G., CACCIA, M., CINI, M., COLETTA, P., MAGGIORE, M., SPIRANDELLI, E. et VERUGGIO, G. (2002). Internet-based satellite teleoperation of the romeo ROV in antarctica. *Proc. of the Medi. Conf. on Control and Automation (MED'02)*, Lisbon, Portugal.
- [Cagneau *et al.*, 2007] CAGNEAU, B., ZEMITI, N., BELLOT, D. et MOREL, G. (2007). Physiological motion compensation in robotized surgery using force feedback control. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'07)*, pages 1881–1886, Roma, Italy.
- [Çavuşoğlu, 2000] ÇAVUŞOĞLU, M. C. (2000). *Telesurgery and Surgical Simulation : Design, Modeling, and Evaluation of Haptic Interface to Real and Virtual Surgical Environments*. Phd thesis, University of California, Berkeley, Berkeley, California, USA.
- [Çavuşoğlu *et al.*, 2005] ÇAVUŞOĞLU, M. C., ROTELLA, J., NEWMAN, W. S., CHOI, S., USTIN, J. et SASTRY, S. S. (2005). Control algorithms for active relative motion cancelling for robotic assisted Off-Pump coronary artery bypass graft surgery. *Proc. of the Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR'05)*, pages 431–436, Seattle, Washington, USA.
- [Çavuşoğlu *et al.*, 2002] ÇAVUŞOĞLU, M. C., SHERMAN, A. et TENDICK, F. (2002). Design of bilateral teleoperation controllers for haptic exploration and telemanipulation of soft environments. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(4):641–647.

- [Çavuşoğlu *et al.*, 1999] ÇAVUŞOĞLU, M. C., TENDICK, F., COHN, M. et SASTRY, S. S. (1999). A laparoscopic telesurgical workstation. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 15(4):728–739.
- [Çavuşoğlu *et al.*, 2001] ÇAVUŞOĞLU, M. C., WILLIAMS, W., TENDICK, F. et SASTRY, S. S. (2001). Robotics for telesurgery : Second generation Berkeley/UCSF laparoscopic telesurgical workstation and looking towards the future applications. *Proc. of the 39th Allerton Con. on Communication, Control and Computing*.
- [Cortês, 2002] CORTÊS, R. (2002). *Kalman Techniques for Intelligent Control Systems : Theory and Robotic Experiments*. Phd thesis, University of Coimbra, Coimbra, Portugal.
- [Cortês *et al.*, 2003] CORTÊS, R., PARK, J. et KHATIB, O. (2003). Real-time adaptive control for haptic manipulation with active observer. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'03)*, volume 3, pages 2938–2943, Las Vegas, Nevada, USA.
- [Cortês *et al.*, 2006a] CORTÊS, R., PARK, J. et KHATIB, O. (2006a). Real time adaptive control for haptic tele-manipulation with kalman active observer. *IEEE Trans. on Robotics*, 22(5):987–999.
- [Cortês *et al.*, 2006b] CORTÊS, R., ZARRAD, W., POIGNET, P., COMPANY, O. et DOMBRE, E. (2006b). Haptic control design for robotic-assisted minimally invasive surgery. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'06)*, pages 454–459, Beijing, China.
- [Cuvillon, 2006] CUVILLON, L. (2006). *Compensation du Battement Cardiaque en Chirurgie Robotisée : Asservissement Visuel d'un Robot Médical avec Flexibilités*. Phd thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- [Davies, 2002] DAVIES, B. L. (2002). Robotic surgery : is a "Hands-On" approach the way forward? *Proc. of Surgetica Computer-Aided Medical Interventions : tools and applications (Surgetica'02)*, pages 57–62, Grenoble, France.
- [Davies *et al.*, 1993] DAVIES, B. L., NG, W. S. et HIBBERD, R. D. (1993). Prostatic resection : An exemple of safe robotic surgery. *Robotica*, 11:561–566.
- [Delgorge *et al.*, 2005] DELGORGE, C., COURREGES, F., BASSIT, L. A., NOVALES, C., ROSENBERGER, C., SMITH-GUERIN, N., BRÛ, C., GILABERT, R., VANNONI, M., POISSON, G. et VIEYRES, P. (2005). A tele-operated mobile ultrasound scanner using a light-weight robot. *IEEE Trans. on Information Technology in Biomedicine*, 9(1):50–58.
- [Deml *et al.*, 2005] DEML, B., ORTMAIER, T. et SEIBOLD, U. (2005). The touch and feel in minimally invasive surgery. *Proc. of the IEEE Int. Work. on Haptic Audio Visual Environment and Their Applications (HAVE'05)*, Ottawa, Ontario, Canada.
- [DiMaio *et al.*, 2007] DIMAIO, S. P., PIEPER, S., CHINZEI, K., HATA, N., HAKER, S. J., KACHER, D. F., FICHTINGER, G., TEMPANY, C. M. et KIKINIS, R. (2007). Robot-assisted needle placement in open mri : System architecture, integration and validation. *J. of Computed Aided Surgery*, 12(1):15–24.
- [DiMaio et Salcudean, 2003] DIMAIO, S. P. et SALCUDÉAN, S. E. (2003). Needle insertion modelling and simulation. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19(5):864–875.
- [Diolaiti *et al.*, 2005a] DIOLAITI, N., MELCHIORRI, C. et STRAMIGIOLI, S. (2005a). Contact impedance estimation for robotic systems. *IEEE Trans. on Robotics*, 21(5):925–935.

- [Diolaiti *et al.*, 2005b] DIOLAITI, N., NIEMEYER, G., BARBAGLI, F., SALISBURY, J. K. et MELCHIORRI, C. (2005b). The effect of quantization and coulomb friction on the stability of haptic rendering. *Proc. of the IEEE First Joint Eurohaptics Conf. and Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (EURO-HAPTICS'05)*, pages 237–246, Pisa, Italy.
- [Dombre *et al.*, 2003] DOMBRE, E., DUCHEMIN, G., POIGNET, P. et PIERROT, F. (2003). Dermarob : A safe robot for reconstructive surgery. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19(5):876–884.
- [Dombre *et al.*, 2004] DOMBRE, E., MICHELIN, M., PIERROT, F., POIGNET, P., BIDAUD, P., MOREL, G., ORTMAIER, T., SALLÉ, D., ZEMITI, N., GRAVEZ, P., KAROUIA, M. et BONNET, N. (2004). Marge project : Design, modelling, and control of assistive devices for minimally invasive surgery. *Proc. of the Int. Conf. on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI'04)*, pages 1–8, St Malo, France.
- [Eagle *et al.*, 2004] EAGLE, K. A., GUYTON, R. A. *et al.* (2004). ACC/AHA 2004 guidelines for coronary artery bypass graft surgery : A report of the american college of cardiology / american heart association task force on practice guidelines. *Journal of the American College of Cardiology*, 44(5):1146–1154.
- [Erickson *et al.*, 2003] ERICKSON, D., WEBER, M. et SHARF, I. (2003). Contact stiffness and damping estimation for robotic systems. *The International Journal of Robotics Research*, 22(1):41–57.
- [Finlay, 1996] FINLAY, P. A. (1996). Clinical experience with a goniometric head-controlled laparoscope manipulator. *Proc. of the IARP Workshop on Medical Robotics*, Vienna.
- [Fite *et al.*, 2004] FITE, K. B., SHAO, L. et GOLDFARB, M. (2004). Loop shaping for transparency and stability robustness in bilateral telemanipulation. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 20(3):620–624.
- [Fite *et al.*, 2001] FITE, K. B., SPEICH, J. E. et GOLDFARB, M. (2001). Transparency and stability robustness in two-channel bilateral telemanipulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 123(3):400–407.
- [Fraisse *et al.*, 2005] FRAISSE, P., ZAPATA, R., ZARRAD, W. et ANDREU, D. (2005). Remote secure decentralized control strategy for mobile robots. *Advanced Robotics Journal*, 19(9):1027–1040.
- [Gangloff *et al.*, 2006] GANGLOFF, J., GINHOUX, R., de MATHELIN, M., SOLER, L. et MARESCAUX, J. (2006). Model predictive control for compensation of cyclic organ motions in teleoperated laparoscopic surgery. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 14(2):235–246.
- [Gerovichev *et al.*, 2002] GEROVICHEV, O., MARAYONG, P. et OKAMURA, A. M. (2002). The effect of visual and haptic feedback on manual and teleoperated needle insertion. *Proc. of the Int. Conf. on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI'02)*, pages 147–154, Tokyo, Japan.
- [Gersem, 2005] GERSEM, G. D. (2005). *Kinaesthetic Feedback and Enhanced Sensitivity in Robotic Endoscopic Telesurgery*. Phd thesis, Catholic University of Leuven, Leuven, Belgium.
- [Gersem *et al.*, 2005] GERSEM, G. D., BRUSSEL, H. V. et TENDICK, F. (2005). Reliable and enhanced stiffness perception in soft-tissue telemanipulation. *International Journal of Robotics Research*, 24(10):805–822.

- [Ginhoux, 2003] GINHOUX, R. (2003). *Compensation des Mouvement Physiologiques en Chirurgie Robotisée par Commande Prédictive*. Phd thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- [Ginhoux et al., 2005] GINHOUX, R., GANGLOFF, J., de MATHELIN, M., SOLER, L., SANCHEZ, M. M. A. et MARESCAUX, J. (2005). Active filtering of physiological motion in robotized surgery using predictive control. *IEEE Trans. on Robotics*, 21(1):67–79.
- [Guthart et Salisbury, 2000] GUTHART, G. S. et SALISBURY, J. K. (2000). The IntuitiveTMtelesurgery system : Overview and application. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'00)*, pages 618–621, San Francisco, CA, USA.
- [H.-Zaad et Salcudean, 1999] H.-ZAAD, K. et SALCUDEAN, S. E. (1999). On the use of local force feedback for transparent teleoperation. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'99)*, pages 1863–1869, Detroit, Michigan, USA.
- [H.-Zaad et Salcudean, 2000] H.-ZAAD, K. et SALCUDEAN, S. E. (2000). Analysis and evaluation of stability and performance robustness for teleoperation control architectures. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'00)*, pages 3107–3113, San Francisco, CA, USA.
- [H.-Zaad et Salcudean, 2001] H.-ZAAD, K. et SALCUDEAN, S. E. (2001). Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 20(6):419–445.
- [H.-Zaad et Salcudean, 2002] H.-ZAAD, K. et SALCUDEAN, S. E. (2002). Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(1):108–445.
- [Hagmann et al., 2004] HAGMANN, E., ROULLER, P., HELMER, P., GRANGE, S. et BAUR, C. (2004). A haptic guidance tool for CT-directed percutaneous interventions. *Proc. of the Annu. Int. Conf. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE EMBS'04)*, volume 1, pages 2746–2749, San Francisco, CA, USA.
- [Hannaford, 1989a] HANNAFORD, B. (1989a). A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 5(4):426–434.
- [Hannaford, 1989b] HANNAFORD, B. (1989b). Stability and performance tradeoffs in bilateral telemanipulation. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'89)*, pages 1764–1767, Scottsdale, AZ, USA.
- [Hannaford et Ryu, 2002] HANNAFORD, B. et RYU, J.-H. (2002). Time-domain passivity control of haptic interfaces. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(1):1–10.
- [Hata et al., 2005] HATA, N., HASHIMOTO, R. et TOKUDA, J. (2005). Needle guiding robot for MR-guided microwave thermotherapy of liver tumor using motorized remote-center-of-motion constraint. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'05)*, pages 1664–1668, Barcelona, Spain.
- [Heverly et al., 2005] HEVERLY, M., DUPONT, P. et TRIEDMAN, J. (2005). Trajectory optimization for dynamic needle insertion. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'05)*, pages 1658–1663, Barcelona, Spain.
- [Hokayem et Spong, 2006] HOKAYEM, P. F. et SPONG, M. W. (2006). Bilateral teleoperation : An historical survey. *Automatica*, 42(12):2035–2057.
- [Hong et al., 2004] HONG, J., DOHI, T., HASHIZUME, M., KONISHI, K. et HATA, N. (2004). An ultrasound-driven needle-insertion robot for percutaneous cholecystostomy. *J. of Physics in Medicine and Biology*, 49(3):441–155.

- [Ikuta *et al.*, 2003] IKUTA, K., HASEGAWA, T. et DAIFU, S. (2003). Hyper redundant miniature manipulator "Hyper Finger" for remote minimally invasive surgery in deep area. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'03)*, pages 1098–1102, Taipei, Taiwan.
- [Jakopec *et al.*, 2001] JAKOPEC, M., HARRIS, S. J., y BAENA, F. R., GOMES, P., COBB, J. et DAVIES, B. L. (2001). The first clinical application of a "Hands-On" robotic knee surgery system. *J. of Computer Aided Surgery*, 6(6):329–339.
- [Jazwinski, 1970] JAZWINSKI, A. H. (1970). *Stochastic Processes and Filtering Theory*. Academic Press.
- [Kalman, 1960] KALMAN, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Int. J. of Basic Engineering, Trans. of the ASME*, 82(Series D):35–45.
- [Kang et Wen, 2001] KANG, H. et WEN, J. T. (2001). Endobot : a robotic assistant in minimally invasive surgeries. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'01)*, pages 2032–2037, Seoul, Korea.
- [Kang et Wen, 2002] KANG, H. et WEN, J. T. (2002). Robotic knot tying in minimally invasive surgery. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'02)*, pages 1421–1426, Lausanne, Switzerland.
- [Kappert *et al.*, 2001] KAPPERT, U., end J. SCHNEIDER, R. C., GULIELMOS, V., AHMADZADE, T., NICOLAI, J., TUGTEKIN, S.-M. et SCHUELER, S. (2001). Technique of closed chest coronary artery surgery on the beating heart. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 20:765–769.
- [Kazerooni *et al.*, 1993] KAZEROONI, H., TSAY, T.-I. et HOLLERBACH, K. (1993). A controller design framework for telerobotic systems. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 1(1):50–62.
- [Khalil et Creusot, 1997] KHALIL, W. et CREUSOT, D. (1997). SYMORO+ : A system for the symbolic modeling of robots. *Robotica*, 15:153–161.
- [Khalil et Dombre, 1999] KHALIL, W. et DOMBRE, E. (1999). *Modélisation identification et commande des robots*. Hermes Science Publications, 2 édition.
- [Khatib, 1980] KHATIB, O. (1980). *Commande Dynamique dans l'Espace Operationnel des Robots Manipulateur en Presence d'Obstacles*. Phd thesis, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, France.
- [Khatib, 1987] KHATIB, O. (1987). A unified approach for motion and force control of robot manipulators : The operational space formulation. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(1):43–53.
- [Khatib *et al.*, 2004] KHATIB, O., BROCK, O., CHANG, K.-S., RUPPINI, D., SENTIS, L. et VIJI, S. (2004). Human-centred robotics and interactive haptic simulation. *International Journal of Robotics Research*, 23(2):167–178.
- [Kim et Hannaford, 2001] KIM, Y. S. et HANNAFORD, B. (2001). Some practical issues in time domain passivity control of haptic interfaces. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'01)*, volume 3, pages 1744–1750, Wailea, Hawaii, USA.
- [Kim *et al.*, 1992] KIM, Y. S., HANNAFORD, B. et BEJCZY, A. K. (1992). Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 8(2):176–185.

- [Kronreif *et al.*, 2003] KRONREIF, G., FÜRST, M., KETTENBACH, J., FIGL, M. et HANEL, R. (2003). Robotic guidance for percutaneous interventions. *Journal of Advanced Robotics*, 17(6):541–560.
- [Krupa *et al.*, 2002] KRUPA, A., MOREL, G. et de MATHELIN, M. (2002). Achieving high precision laparoscopic manipulation through adaptive force control. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'02)*, pages 1864–1869, Washington. DC, USA.
- [Kuchenbeker *et al.*, 2003] KUCHENBEKER, K. J., PARK, J. G. et NIEMEYER, G. (2003). Characterizing the human wrist for improved haptic interaction. *Proc. of the Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE'03)*, volume 2, Washington, D.C, USA.
- [Kwoh *et al.*, 1988] KWOH, Y. S., HOU, J. et JONCKHEERE, E. A. (1988). A robot with improved absolute positioning accuracy for CT-guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 35(2):153–160.
- [Lawrence, 1993] LAWRENCE, A. (1993). Stability and transparency in bilateral teleoperation. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 9(5):624–637.
- [Lemma *et al.*, 2005] LEMMA, M., MANGINI, A., REDAELLI, A. et ACOCCELLA, F. (2005). Do cardiac stabilizers really stabilize ? experimental quantitative analysis of mechanical stabilization. *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery*, 4:222–226.
- [Ljung et Söderström, 1983] LJUNG, L. et SÖDERSTRÖM, T. (1983). *Theory and Practice of Recursive Identification*. The MIT Press.
- [Loisance *et al.*, 2005] LOISANCE, D. Y., NAKASHIMA, K. et KIRSCH, M. (2005). Computer-assisted coronary surgery : Lessons from an initial experience. *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery*, 4:398–401.
- [Love et Book, 2004] LOVE, L. J. et BOOK, W. J. (2004). Force reflecting teleoperation with adaptive impedance control. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics - Part B : Cybernetics*, 34(1):159–165.
- [Luenberger, 1966] LUENBERGER, D. G. (1966). Observers for multivariable systems. *Automatica*, 11(2):190–197.
- [Madhani, 1998] MADHANI, A. J. (1998). *Design of Teleoperated Surgical Instruments for Minimally Invasive Surgery*. Phd thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, USA.
- [Madhani *et al.*, 1998] MADHANI, A. J., NIEMEYER, G. et JR, J. K. S. (1998). The Black Falcom : A teleoperated surgical instrument for minimally invasive surgery. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'98)*, pages 936–944, Victoria. B. C, Canada.
- [Maillet, 2006] MAILLET, P. (2006). *Développement d'un robot pour la chirurgie orthopédique et d'une méthodologie pour sa mise en œuvre*. Phd thesis, Université Montpellier II, Montpellier, France. Confidential until December 2011.
- [Maillet *et al.*, 2005] MAILLET, P., NAHUM, B., BLONDEL, L., POIGNET, P. et DOMBRE, E. (2005). BRIGIT, a robotized tool guide for orthopedic surgery. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'05)*, pages 212–217, Barcelona, Spain.
- [Marescaux *et al.*, 2001] MARESCAUX, J., LEROY, J., GAGNER, M., RUBINO, F., MUTTER, D., VIX, M., BUTNER, S. E. et SMITH, M. K. (2001). Transatlantic robot assisted telesurgery. *Nature*, 413:379–380.

- [Masamune *et al.*, 2001] MASAMUNE, K., FICHTINGER, G., PATRICIU, A., SUSIL, R. C., TAYLOR, R. H., KAVOUSSI, L. R., ANDERSON, J. H., SAKUMA, I., DOHI, T. et STOIANOVICI, D. (2001). System for robotically assisted percutaneous procedures with computed tomography guidance. *J. of Computed Aided Surgery*, 6(6):670–383.
- [Maurel, 1999] MAUREL, W. (1999). *3D Modeling of the Human Upper Limb Including the Biomechanics of Joints, Muscles and Soft Tissues*. Phd thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Suisse.
- [Maurin *et al.*, 2004a] MAURIN, B., BARBÉ, B., BAYLE, B., ZANNE, P., GANGLOFF, J., de MATHELIN, M., GANGI, A. et FORGIONNE, A. (2004a). In vivo study of forces during needle insertions. *Proc. of the Int. Conf. on Medical Robotics Navigation and Visualization (MRNV'04)*, Remagen, Germany.
- [Maurin *et al.*, 2006] MAURIN, B., BAYLE, B., GANGLOFF, J., ZANNE, P., de MATHELIN, M. et PICCIN, O. (2006). A robotized positioning platform guided by computed tomography : Practical issues and evaluation. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'06)*, pages 251–256, Orlando, Florida , USA.
- [Maurin *et al.*, 2004b] MAURIN, B., PICCIN, O., BAYLE, B., GANGLOFF, J., de MATHELIN, M., SOLER, L. et GANGI, A. (2004b). A new robotic system for CT-guided percutaneous procedure with haptic feedback. *Proc. of the Int. Conf. on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS'04)*, pages 515–520, Chicago, USA.
- [Meister *et al.*, 1998] MEISTER, D., POKRANDT, P. et BOTH, A. (1998). Milling accuracy in robot assisted orthopaedic surgery. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics Society (IECON'98)*, volume 4, pages 2502–2505, Aachen, Germany.
- [Michelin, 2004] MICHELIN, M. (2004). *Contribution à la Commande de Robots pour la Chirurgie Mini-Invasive*. Phd thesis, Université Montpellier II, Montpellier, France.
- [Michelin *et al.*, 2004] MICHELIN, M., POIGNET, P. et DOMBRE, E. (2004). Dynamic task posture decoupling for minimally invasive surgery motions. *Proc. of the Int. Symposium on Experimental Robotics (ISER'04)*, Singapour.
- [Michelin *et al.*, 2002] MICHELIN, M., POIGNET, P., DOMBRE, E., PIERROT, F. et ECKERT, L. (2002). Path planning under a penetration point constraint for minimally invasive surgery. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'02)*, pages 1475–1480, Lausanne, Switzerland.
- [Misra et Okamura, 2006] MISRA, S. et OKAMURA, A. M. (2006). Environment parameter estimation during bilateral telemanipulation. *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'06)*, pages 301–307, Alexandria, Virginia, USA.
- [Nakamura *et al.*, 2001] NAKAMURA, Y., KISHI, K. et KAWAKAMI, H. (2001). Heartbeat synchronization for robotic cardiac surgery. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'01)*, volume 2, pages 2014–2019, Seoul, Korea.
- [Niemeyer et Slotine, 1991] NIEMEYER, G. et SLOTINE, J.-J. E. (1991). Stable adaptive teleoperation. *The International Journal of Oceanic Engineering*, 16(1):152–162.
- [Ogata, 2002] OGATA, K. (2002). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 4 édition. (International Edition).
- [Okamura *et al.*, 2004] OKAMURA, A. M., SIMONE, C. et O'LEARY, M. D. (2004). Force modeling for needle insertion into soft tissue. *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 51(10):1707–1716.

- [Ortmaier, 2002] ORTMAIER, T. J. (2002). *Motion Compensation in Minimally Invasive Robotic Surgery*. Phd thesis, Technical University of Munich, Munich, Germany.
- [Pan *et al.*, 2006] PAN, Y. J., de WIT, C. C. et SENAME, O. (2006). A new predictive approach for bilateral teleoperation with applications to drive-by-wire systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(6):1146–1162.
- [Park et Cho, 199] PARK, J. H. et CHO, H. C. (199). Sliding-mode controller for bilateral teleoperation with varying time delay. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Advanced Intellectual Mechanics (AIM'05)*, pages 311–316, Atlante, GA, USA.
- [Peirs *et al.*, 2004] PEIRS, J., CLIJNEN, J., REYNAERTS, D., BRUSSEL, H. V., HERIJGERS, P., CORTEVILLE, B. et BOONE, S. (2004). A micro optical force sensor for force feedback during minimally invasive robotic surgery. *Sensors and Actuators A : Physical*, 115(2-3):447–455.
- [Pierrot *et al.*, 1999] PIERROT, F., DOMBRE, E., DÉGOULANGE, E., URBAIN, L., CARON, P., BOUDET, S., GARIEPY, J. et MEGNIEN, J. (1999). Hippocrate :a safe robot arm for medical application with force feedback. *The J. of Medical Image Analysis*, 3(3):285–300.
- [Polet et Donnez, 2004] POLET, R. et DONNEZ, J. (2004). Gynecologic laparoscopic surgery with a palm-controlled laparoscope holder. *The J. of the American Association of Gynecologic Laparoscopists*, 11(1):73–78.
- [Preusche *et al.*, 2002] PREUSCHE, C., ORTMAIER, T. J. et HIRZINGER, G. (2002). Teleoperation concepts in minimally invasive surgery. *Control Engineering Practice Journal*, 10(11):1245–1250.
- [Reintsema *et al.*, 2004] REINTSEMA, D., PREUSCHE, C., ORTMAIER, T. J. et HIRZINGER, G. (2004). Towards high fidelity telepresence in space and surgery robotics. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 13(1):77–98.
- [Rininsland, 1999] RININSLAND, H. (1999). ARTEMIS. a telemanipulator for cardiac surgery. *European J. of Cardio-thoracic surgery*, 16:106–111.
- [Riviere *et al.*, 2003] RIVIERE, C. N., WEI, T. A. et KHOSLA, P. K. (2003). Toward active tremor canceling in handheld microsurgical instruments. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19(5):793–800.
- [Sallé *et al.*, 2004] SALLÉ, D., CEPOLINA, F. et BIDAUT, P. (2004). Surgery grippers for minimally invasive heart surgery. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Manipulation and Grasping (IMG'04)*, pages 172–179, Genova, Italy.
- [Schneider et Troccaz, 2001] SCHNEIDER, O. et TROCCAZ, J. (2001). A six-degree-of-freedom passive arm with dynamic constraints (PADyC) for cardiac surgery application : Preliminary experiments. *J. of Computer Aided Surgery*, 6(6):340–351.
- [Seibold *et al.*, 2005] SEIBOLD, U., KÜBLER, B. et HIRZINGER, G. (2005). Prototype of instrument for minimally invasive surgery with 6-axis force sensing capability. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'05)*, pages 503–498, Barcelona, Spain.
- [Sename et Fattouh, 2005] SENAME, O. et FATTOUH, A. (2005). Robust H_∞ control of a bilateral teleoperation system under communication time-delay. *Proc. of the 16th IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic.
- [Sentis et Khatib, 2005] SENTIS, L. et KHATIB, O. (2005). Control of free-floating humanoid robots through task prioritization. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'05)*, pages 1730–1735, Barcelona, Spain.

- [Siciliano, 1990] SICILIANO, B. (1990). Kinematic control redundant robot manipulators tutorial. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 3(3):201–212.
- [Simone et Okamura, 2002] SIMONE, C. et OKAMURA, A. M. (2002). Modeling of needle insertion forces for robot-assisted percutaneous therapy. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'02)*, pages 2085–2091, Washington. DC, USA.
- [Speich et al., 2005] SPEICH, J. E., SHAO, L. et GOLDFARD, M. (2005). Modeling the human hand as it interacts with a telemanipulation system. *Mechatronics*, 15(9):1127–1142.
- [Stoianovici et al., 2003] STOIANOVICI, D., CLEARY, K., PATRICIU, A., MAZILU, D., STANIMIR, A., CRACIUNOIU, N., WATSON, V. et KAVOUSSI, L. (2003). AcuBot : A robot for radiological interventions. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19(5):927–930.
- [Tadano et Kawashima, 2007] TADANO, K. et KAWASHIMA, K. (2007). Development of a master slave system with force sensing using pneumatic servo system for laparoscopic surgery. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'07)*, pages 947–952, Roma, Italy.
- [Tanner et Niemeyer, 2005] TANNER, N. A. et NIEMEYER, G. (2005). Improving perception in time-delayed telerobotics. *The International Journal of Robotics Research*, 24(8):631–644.
- [Taylor et al., 1993] TAYLOR, R. H., MITTELSTADT, B. D., PAUL, H. A., HANSON, W., KAZANZIDES, P., ZUHARS, J. F., WILLIAMSON, B., MUSITS, B. L., GLASSMAN, E. et BARGAR, W. L. (1993). An image-directed robotic system for precise orthopaedic surgery. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 10(3):261–275.
- [Taylor et Stoianovici, 2003] TAYLOR, R. H. et STOIANOVICI, D. (2003). Medical robotics in computer-integrated surgery. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19(5):765–781.
- [Viguié, 2005] VIGUIER, C. (2005). *Contribution au Développement d'Actionneurs Electroactifs pour l'Assistance Circulatoire Application à la Mise au Point d'une Fonction Antithrombotique*. Phd thesis, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France.
- [Vilchis et al., 2001] VILCHIS, A., CINQUIN, P., TROCCAZ, J., GUERRAZ, A., HENNION, B., PELLISSIER, F., THOREL, P., COURRÉGES, F., GOUDRON, A., POISSON, G., VIEYERES, P., CARON, P., MÉRIGEAUX, O., URBAIN, L., DAIMO, C., LAVALLÉE, S., ARBEILLE, P., ALTHUSER, M., AYOUBI, J.-M., TONDU, B. et IPPOLITO, S. (2001). Ter : A system for robotic tele-echography. *Proc. of the Int. Conf. on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI'01)*, pages 326–334, Utrecht, Netherlands.
- [Wagner et Howe, 2005] WAGNER, C. R. et HOWE, R. D. (2005). Mechanisms of performance enhancement with force feedback. *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'05)*, pages 21–29, Pisa, Italy.
- [Wagner et al., 2002] WAGNER, C. R., STYLOPOULOS, N. et HOWE, R. D. (2002). The role of force feedback in surgery : Analysis of blunt dissection. *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'02)*, pages 68–74.

- [Wang et Yuan, 2004] WANG, W. et YUAN, K. (2004). Teleoperated manipulator for leak detection of sealed radioactive sources. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'04)*, pages 1682–1687, New Orleans, LA, USA.
- [Wang et al., 2005] WANG, X., LIU, P. X., CHEBBI, B., WANG, D. et MENG, M. (2005). Design of bilateral teleoperators for soft environments with adaptive environmental impedance estimation. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'05)*, pages 1139–1144, Barcelona, Spain.
- [Weber et al., 2006] WEBER, M., PATEL, K., MA, O. et SHARF, I. (2006). Identification on contact dynamic model parameters from constrained robotic operations. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 128(2):307–318.
- [Wijeyesundera et al., 2005] WIJEYSUNDERA, D. N., BEATTIE, W. S., DJAIANI, G., RAO, V., BORGER, M. A., KARKOUTI, K. et CUSIMANO, R. J. (2005). Off-Pump Coronary Artery Surgery for reducing mortality and morbidity : Meta-analysis of randomized and observational studies. *Journal of the American College of Cardiology*, 46(5):872–882.
- [Yang et al., 2005] YANG, H., LIU, P. X. et ZHANG, J. (2005). Modelling of needle insertion forces for surgical simulation. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation (ICMA'05)*, pages 592–595, Niagara Falls, Canada.
- [Yokokohji et Yoshikawa, 1994] YOKOKOHI, Y. et YOSHIKAWA, T. (1994). Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling formulation and experiment. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 10(5):605–620.
- [Zarrad et al., 2007a] ZARRAD, W., POIGNET, P., CORTESÃO, R. et COMPANY, O. (2007a). Haptic feedback control in medical robotics through stiffness estimation with extended kalman filter. *Proc. of the Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR'07)*, pages 81–87, Jeju, South Korea.
- [Zarrad et al., 2007b] ZARRAD, W., POIGNET, P., CORTESÃO, R. et COMPANY, O. (2007b). Robotic-assisted surgery through haptic feedback teleoperation controller. *Proc. of Surgetica Computer-Aided Medical Interventions : tools and applications (Surgetica'07)*, pages 351–359, Chambéry, France.
- [Zarrad et al., 2007c] ZARRAD, W., POIGNET, P., CORTESÃO, R. et COMPANY, O. (2007c). Stability and transparency analysis of on haptic feedback controller for medical applications. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Decision and Control (CDC'07)*, pages 5767–5772, New Orleans, Louisiana, USA.
- [Zarrad et al., 2007d] ZARRAD, W., POIGNET, P., CORTESÃO, R. et COMPANY, O. (2007d). Towards teleoperated needle insertion with haptic feedback controller. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'07)*, pages 1254–1259, San Diego, California, USA.
- [Zemiti, 2005] ZEMITI, N. (2005). *Commande en Effort des Systèmes Robotiques pour la Chirurgie Mini-Invasive*. Phd thesis, Université Paris 6, Paris, France.
- [Zemiti et al., 2004] ZEMITI, N., ORTMAIER, T. et MOREL, G. (2004). A new robot for force control in minimally invasive surgery. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'04)*, pages 3643–3648, Sendai, Japan.
- [Zhu et Salcudean, 1995] ZHU, M. et SALCUDAN, S. E. (1995). Achieving transparency for teleoperator systems under position and rate control. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'95)*, volume 2, pages 7–12, Pittsburgh, PA, USA.

Annexe A

Modèle géométrique et dynamique du robot D2M2

Description géométrique du robot D2M2

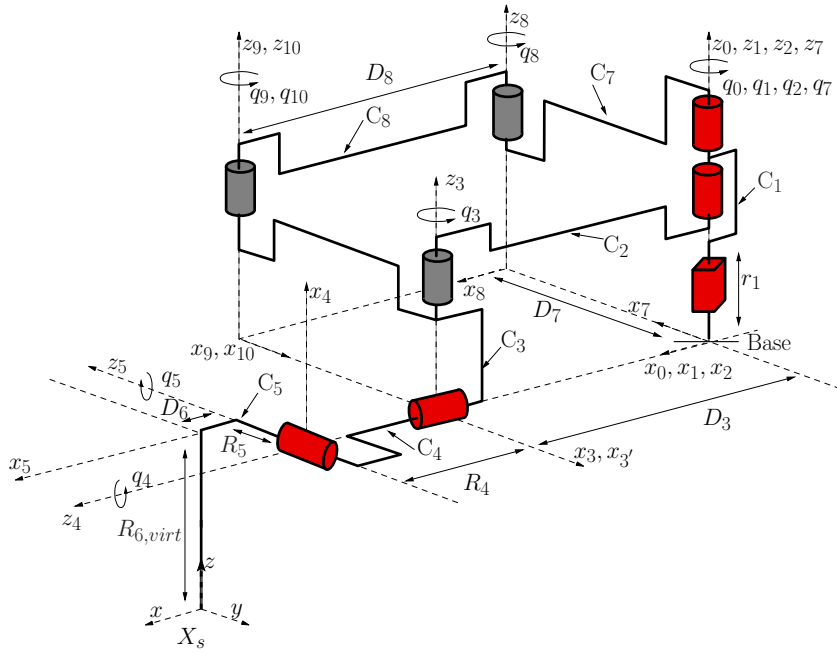


Figure A.1 - Cinématique du robot D2M2.

Le robot **D2M2** comporte une transmission par courroie entre l'articulation q_7 et q_3 . Pour représenter cette transmission, des corps supplémentaires (C_7 et C_8) et des articulations non motorisées passives (q_8 et q_9) ont été ajoutées. Il devient alors un mécanisme à cinq degrés de liberté, sept corps mobiles et huit articulations (une prismatique et sept rotoïdes) (cf. Figure A.1). Il comporte une boucle fermée de type parallélogramme. Les articulations 3, 8 et 9 ne sont pas motorisées. La boucle est ouverte sur l'articulation 9 entre le corps C_3 et C_8 . Les paramètres du robot sont donnés dans le Tableau A.1. L'axe 6 correspond à l'effecteur du robot [Khalil et Dombre, 1999]. Les valeurs numériques des paramètres géométriques sont :

- $D_3 = 0.4$ [m],
- $R_4 = 0.451$ [m],

j	a_j	μ_j	σ_j	γ_j	b_j	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	0	1	1	0	0	0	0	0	r_1
2	1	1	0	0	0	0	0	$\theta_2 = q_2$	0
3	2	0	0	0	0	0	D_3	θ_3	0
4	3	1	0	0	0	$\pi/2$	0	$\theta_4 = q_4 + \pi/2$	R_4
5	4	1	0	0	0	$-\pi/2$	0	$\theta_5 = q_5 - \pi/2$	R_5
6	5	0	0	0	0	$-\pi/2$	D_6	0	$-R_6$
7	1	1	0	0	0	0	0	$\theta_7 = q_7 - \pi/2$	0
8	7	0	0	0	0	0	D_8	θ_8	0
9	8	0	0	0	0	0	$D_9 = D_3$	θ_9	0
10	3	0	2	0	0	0	$D_{10} = -D_8$	0	0

 Tableau A.1 - Table de Denavit-Hartenberg du robot **D2M2**.

- $R_5 = 0.0$ [m],
- $D_6 = 0.0$ [m],
- $R_6 = 0.405$ [m],
- $D_7 = 0.1$ [m] et
- $D_8 = D_3$.

Résolution des équations de contraintes

Les boucles de type parallélogramme ont trois variables passives. Dans ce cas, en supposant que les corps opposés (C_2 - C_8 et C_3 - C_7) sont de même dimension et toujours parallèles alors les matrices d'orientation (3×3), qui définissent les rotations entre le repère 2 et 8 et le repère 3 et 7 sont constantes :

$${}^{k_2}A_{k_8} = \text{rot}(u, \theta_8) = \text{cst} \quad (\text{A.1})$$

et

$${}^{k_7}A_{k_3} = \text{rot}(u, \theta_7) = \text{cst} \quad (\text{A.2})$$

De plus les équations d'orientation de la boucle fermée donnent :

$${}^{k_2}A_{k_8} = {}^{k_2}A_{k_1} {}^{k_1}A_{k_7} {}^{k_7}A_{k_8} = \text{rot}(z, -\theta_2 + \theta_7 + \theta_8) = \text{rot}(z, 0), \quad (\text{A.3})$$

$${}^{k_7}A_{k_3} = {}^{k_7}A_{k_1} {}^{k_1}A_{k_2} {}^{k_2}A_{k_3} = \text{rot}(z, -\theta_7 + \theta_2 + \theta_3) = \text{rot}(z, \pi), \quad (\text{A.4})$$

et

$${}^{k_9}A_{k_{10}} = {}^{k_9}A_{k_8} {}^{k_8}A_{k_7} {}^{k_7}A_{k_1} {}^{k_1}A_{k_2} {}^{k_2}A_{k_3} {}^{k_3}A_{k_{10}} = I_3. \quad (\text{A.5})$$

En substituant l'équation (A.2) dans (A.5), la matrice d'orientation ${}^{k_9}A_{k_{10}}$ devient

$${}^{k_9}A_{k_{10}} = {}^{k_7}A_{k_8} {}^{k_8}A_{k_7} {}^{k_7}A_{k_3} {}^{k_3}A_{k_{10}} = \text{rot}(z, -\theta_9 - \theta_8 + \pi - 0) = \text{rot}(z, 0). \quad (\text{A.6})$$

Les relations (A.3), (A.4) et (A.6), permettent de calculer les trois variables articulaires passives θ_3 , θ_8 et θ_9 et donc de déterminer les équations de contraintes définies par le parallélogramme données par :

$$\theta_3 = \pi + \theta_7 - \theta_2, \quad (\text{A.7})$$

j	XX_j	YY_j	ZZ_j	MX_j	MY_j	MZ_j	M_j	I_{a_j}
Unités	[Kg.m ²]	[Kg.m ²]	[Kg.m ²]	[Kg.m]	[Kg.m]	[Kg.m]	[Kg]	[Kg.m ²]
1	0	0	0	0	0	0	33.925	0
2	0	0	1.259	0	0	0	0	0
3	0	0	0.434	0.236	-0.522	0	0	0
4	0	0	0.073	0.061	-0.082	0	0	0.0025
5	0.019	0	0.071	0.015	-0.075	0	0	0.0025
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0.0150
8	0	0	0	0	0.026	0	0	0

 Tableau A.2 - Paramètres dynamiques du robot **D2M2**.

$$\theta_8 = \theta_7 - \theta_2 \quad (\text{A.8})$$

et

$$\theta_9 = \pi - \theta_2 + \theta_7. \quad (\text{A.9})$$

Nous définissons deux vecteurs de positions articulaires généralisés : $\mathbf{q}$ vecteur des variables articulaires actives (motorisées) et $\mathbf{q}_p$ vecteur des variables articulaires passives. Ils sont donnés par :

$$\mathbf{q} = [r_1 \quad \theta_2 \quad \theta_4 \quad \theta_5 \quad \theta_7]^T \quad (\text{A.10})$$

et

$$\mathbf{q}_p = [\theta_3 \quad \theta_6 \quad \theta_8]^T. \quad (\text{A.11})$$

Modèle dynamique

Les paramètres dynamiques regroupés du robot **D2M2** sont données dans le Tableau A.2.

Le vecteur des couples moteurs $\boldsymbol{\tau}_{sc}$ appliqués aux articulations actives est donné par :

$$\boldsymbol{\tau}_{sc} = \boldsymbol{\tau}_{sc,a} + W^T \boldsymbol{\tau}_{sc,p}, \quad (\text{A.12})$$

où W est la jacobienne des variables articulaires passives $\mathbf{q}_p$ par rapport aux variables articulaires actives $\mathbf{q}$. Elle est donnée par :

$$W = \frac{\partial \mathbf{q}_p}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.13})$$

$\boldsymbol{\tau}_{sc,a}$ et $\boldsymbol{\tau}_{sc,p}$ désignent respectivement les vecteurs couples / forces des éléments relatifs aux articulations actives et passives. Le modèle dynamique a été calculé par le logiciel SYMORO [Khalil et Creusot, 1997].

Titre

Télé-opération avec retour d'effort pour la chirurgie mini-invasive.

Résumé

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre de l'assistance robotique pour la chirurgie mini-invasive télé-opérée. L'une des principales limitations des systèmes existants concerne l'absence de restitution des efforts au chirurgien lorsqu'il télé-opère le robot. Ainsi, un système de télé-opération avec retour d'effort est proposé. Il est basé sur une architecture position - position avec une commande en effort du robot esclave. Cette dernière utilise un découplage non-linéaire du robot ainsi que des techniques d'observation et de commande par retour d'état. Des validations expérimentales ont montré les performances de l'architecture lors d'une télé-opération en espace libre et lors d'interactions avec un environnement de faible rigidité. Une première contribution est l'estimation en ligne de la raideur de l'environnement afin de garantir la stabilité du système lors d'interactions avec un environnement rigide. Cette stratégie utilise un filtre de Kalman étendu qui s'affranchit de la position de repos de l'environnement et qui considère une compensation des erreurs de modélisation du robot esclave. La deuxième contribution est l'étude de la transparence et de la stabilité de l'architecture de télé-opération. Une adaptation des paramètres de commande en fonction de la raideur estimée est proposée en considérant un compromis entre ces deux critères. La structure a été validée expérimentalement en considérant un environnement constitué de tissus *ex-vivo*. Une dernière contribution est l'adaptation de l'architecture de télé-opération avec retour d'effort aux contraintes imposées par la chirurgie mini-invasive. La première est le passage de l'instrument du robot par le trocart. Une architecture de commande utilisant le principe du découplage tâche - posture est alors proposée. La posture permettant le passage par le trocart est contrôlée en considérant la commande en position d'un robot virtuel attaché à l'instrument du robot télé-opéré. La deuxième contrainte considérée est la compensation des mouvements physiologiques. L'objectif étant d'offrir au chirurgien une stabilisation virtuelle de l'organe. L'approche de commande consiste à atténuer les perturbations dans les efforts appliqués sur un environnement en mouvement. La compensation repose sur une commande référencée modèle qui considère que les perturbations atténuées génèrent un déplacement du robot esclave. Des expérimentations ont montré la pertinence et l'efficacité des stratégies proposées.

Mots clés : Robotique médicale, Télé-opération avec retour d'effort, Commande adaptative en effort, Estimation paramétrique, Transparence et stabilité, Chirurgie mini-invasive.

Title

Force feedback tele-operation system for minimally invasive surgery.

Abstract

This work concerns robotic assisted minimally invasive surgery. Nowadays, dedicated robotized systems do not include force feedback to the surgeon. Here, a force feedback teleoperation system is proposed. It is based on a position - position architecture and a slave robot force controller. The architecture enables teleoperation in free space as well as interactions with soft environment. The first contribution is the online environment stiffness estimation to guarantee stability of the system in contact with stiff object. Without considering a contact position, the parameter estimation strategy uses an extended Kalman filter technique with robot modeling errors compensation. The second contribution is the transparency and stability analysis of the force feedback teleoperation system. Based on the transparency and stability trade off, the architecture parameters are updated to guarantee a desired transparency. Experimental results using *ex-vivo* tissues, have shown good performances in contact with soft and stiff surfaces and for a teleoperated needle insertion task. The force feedback teleoperation scheme is then adapted to the minimally invasive surgery constraints. The first one is the trocar constraint. A secondary task is performed by a virtual null space robot, which attempts to have always the trocar position on the medical instrument. The second considered constraint is the physiological motion compensation during beating heart surgery. A force disturbance rejection control law is performed to compensate the environment motion. Experimental results have shown the relevance and the effectiveness of the proposed strategies.

Keywords : Medical robotic, Force feedback tele-operation system, Adaptive force control, Parameter estimation, Transparency and stability, Minimally invasive surgery.

Discipline : Génie Informatique, Automatique et Traitement du signal

Intitulé et adresse du laboratoire :

Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM)
UMR CNRS / Université de Montpellier II, No. 5506
161 rue Ada, 34092 Montpellier, France