



Synthèse et commande de dispositifs haptiques pour la communication à distance : application à une interface robotique anthropomorphe pour la poignée de main

Nicolo Pedemonte

Doctorat en génie mécanique

Québec, Canada

© Nicolo Pedemonte, 2014

Résumé

Les systèmes de communication à distance entre les individus ont évolué significativement au cours des dernières années, de concert avec les innovations technologiques caractérisant notre société. Afin de réaliser une communication réaliste et intuitive, le système doit être capable de stimuler les sens qui sont habituellement impliqués dans l'interaction entre deux personnes, tels que l'ouïe, la vision et le toucher. Le téléphone a représenté une innovation importante dans les communications en permettant enfin de pouvoir parler avec son interlocuteur directement, sans devoir employer un signal codé comme le code Morse. Cette communication a été améliorée en introduisant les appels vidéo, lesquels permettent non seulement d'entendre l'interlocuteur mais aussi de le voir. Plusieurs recherches ont cependant démontré que le sens du toucher joue également un rôle très important dans les interactions entre individus. Une technologie relativement récente, connue comme technologie haptique, aborde le problème de la transmission du sens du toucher à distance, dans le but de mettre en œuvre une communication complète et encore plus réaliste. Cette technologie a également d'autres applications tout aussi importantes. À titre d'exemple, l'haptique est utilisée dans le domaine de la réadaptation et de l'apprentissage guidé de personnes ayant des déficiences motrices.

Cette thèse porte sur le développement de la technologie haptique pour la communication à distance entre deux individus. L'objectif final est la réalisation d'un système permettant aux deux utilisateurs de se serrer la main à distance. Afin d'atteindre cet objectif, nous devons aborder deux problèmes différents, tels que la conception d'une interface capable de reproduire le mouvement désiré et l'implémentation d'une loi de commande garantissant le comportement correct de cette interface. Toujours dans le cadre de l'interaction à distance par le biais d'un dispositif haptique, une interface pour l'apprentissage de l'écriture manuelle est également présentée. Cette application permet de démontrer, entre autres, l'importance d'un signal haptique dans l'interaction humain-humain et son influence sur les utilisateurs.

Summary

Remote communication systems have significantly improved in the course of the recent years, in concert with technological innovations of our society. In order to realize a realistic and intuitive communication, the system must activate the part of the sensory system that is normally stimulated in an interaction between two people, i.e., the auditory system, the visual system and the haptic perception system, which concerns touch. The telephone represented an innovating communication system. It allowed to directly talk to the interlocutor without any need for a coded signal such as the Morse code. Remote communications have been further improved with the introduction of the video calls, which allow people not only to talk to but also to see each other. Several researches proved that the sense of touch plays a crucial role in social interactions. Haptic technology, which is relatively recent, approaches the problems related to the perception and the transmission of touch. One objective is to render remote communications even more complete and realistic. Haptic technology is also used in other important applications such as, for instance, rehabilitation and guided learning process of people with movement impairments.

This thesis concerns the development of the haptic technology devoted to the implementation of remote communication systems. The final objective is to realize a teleoperation system which allows two users to remotely shake hands. In order to achieve this objective, two main issues must be faced : the design of a haptic interface capable of reproducing the required movement and the implementation of a control law which guarantees the proper response of such an interface. In the framework of a remote interaction via a haptic device, an interface for the training and assessment of handwriting capabilities is also presented. The latter application demonstrates the importance of haptic signals in a remote human-human interaction and its influence on the users.

Table des matières

Résumé	iii
Summary	v
Table des matières	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	xi
Liste des extensions multimédias	xiii
Avant-propos	xv
Introduction	1
1 Définition et développement de la loi de commande	7
1.1 Introduction à la commande en force	8
1.2 Commande par impédance	10
1.3 Commande par admittance	18
1.4 Conclusion	28
2 HARRI : l'interface haptique anthropomorphe pour une poignée de main robotique	31
2.1 Introduction à l'interaction humain-robot	32
2.2 Conception et réalisation de l'interface	33
2.3 Commande	49
2.4 Séance expérimentale	60
2.5 Modifications à la commande suite au test KUKA	66
2.6 Conclusion	68
3 Communication haptique à distance	71
3.1 Introduction à la communication humain-humain à distance	73
3.2 Premier système de communication : le mécanisme à bras de levier à un degré de liberté	75

3.3	Second système de communication : le mécanisme à pince à un degré de liberté	86
3.4	Système de communication final : le dispositif HARRI	91
3.5	Conclusion	119
4	Coopération humain-humain dans le cadre de l'apprentissage à distance	123
4.1	Haptique et réadaptation	124
4.2	Cinématique du mécanisme parallèle	128
4.3	Loi de commande par impédance	131
4.4	Première séance expérimentale : apprentissage via rétroaction haptique	133
4.5	Deuxième séance expérimentale : le test à blanc	143
4.6	Conclusion	146
	Conclusion	149
	Bibliographie	155

Liste des tableaux

2.1	Couples et vitesses maximales à la sortie du réducteur, pour le moteur Maxon avec les choix possibles de rapport de réduction.	36
2.2	Couple et vitesse demandés en entrée de la vis pour satisfaire respectivement les conditions de force et de vitesse.	44
2.3	Données du test KUKA.	63
3.1	Raideurs des trois ressorts.	77
3.2	Identification d'une séquence.	78
3.3	La performance moyenne de tous les participants pendant le test.	79
3.4	Identification de trois ressorts.	79
3.5	Valeurs de pourcentage d'identification correcte pour toute transition possible entre deux ressorts.	80
3.6	Identification de quatre objets en utilisant le mécanisme à bras de levier.	83
3.7	Le pourcentage d'identification de quatre objets.	84
3.8	Raideurs des quatre objets présentés estimées à travers le premier système de télé-opération.	86
3.9	Identification des quatre objets en utilisant le mécanisme à pince.	88
3.10	Raideurs des quatre objets présentés estimées à travers le premier système de télé-opération.	90
3.11	Le pourcentage d'identification de quatre objets lors du test avec le mécanisme à pince.	90
3.12	Forces externes mesurées par le robot Baxter sur le long de l'axe Z vertical et de l'axe Y horizontal. Toutes les valeurs sont exprimées en Newton (N).	111
3.13	Données expérimentales de la séance avec le mécanisme à rail. Les hauteurs moyennes sont mesurées par rapport à la position initiale de l'interface. Toutes les valeurs sont en centimètres.	119
4.1	Test d'apprentissage : écarts entre les participants et l'enseignant (mm).	141
4.2	Test à blanc : écarts entre les participants et le modèle de référence (mm).	144
A.1	Valeurs de force de serrage, en Newton, mesurées pendant le test.	172

Liste des figures

0.1	Deux exemples de systèmes de télé-opération : à gauche le robot détonateur et à droite le robot médical Da Vinci.	2
0.2	L'évolution des technologies de télécommunication.	4
0.3	Le dispositif haptique inTouch [Brave and Dahley, 1997].	5
1.1	Schéma de commande par impédance cartésienne	11
1.2	Schéma du système de télé-opération composé de deux bras de levier. . . .	13
1.3	Schéma du système de télé-opération composé de deux bras de levier. . . .	14
1.4	Suivi de position pour $K_v = 0,85$ et $C_v = 0,025$, soit les valeurs qui seront ensuite choisies pour le système.	15
1.5	Différence de phase en fonction du coefficient de gain K_v	16
1.6	Test avec $K_v = 0,85$, $C_v = 0,015$ et $f = 8$. Le mécanisme esclave dépasse la trajectoire indiquée par le mécanisme maître car l'amortissement est trop faible.	17
1.7	Différence de phase pour deux valeurs d'amortissement différentes.	17
1.8	Le capteur de force utilisé dans cette thèse : 3134 Micro Load Cell (0-20kg) - CZL635 (Phidgets).	23
1.9	L'amplificateur EI1040 (LabJack).	23
1.10	Représentation schématique du système de télé-opération bilatéral contrôlé en admittance.	25
1.11	Le mécanisme à un degré de liberté avec cellule de charge.	26
1.12	Comparaison entre le suivi de trajectoire effectué avec la loi de commande en position simple, à gauche, et le suivi de trajectoire effectué avec la commande par admittance, à droite.	29
2.1	Le dynamomètre dygital JAMAR Plus+.	34
2.2	Le mécanisme parallèle à pince à un degré de liberté.	35
2.3	À gauche, une illustration schématique du principe de fonctionnement de la double crémaillère. À droite, une vue interne et frontale du dispositif. . . .	35
2.4	Séquence de fermeture d'un doigt sous-actionné à deux degrés de liberté [Laliberté et al., 2002].	38
2.5	En haut à gauche, le design géométrique du doigt sous-actionné proposé par [Gosselin et al., 2008]. En haut à droite, le modèle CAO du doigt présenté par [Baril et al., 2012]. En bas au centre, le prototype final de doigt pour la nouvelle interface.	38

2.6	Les configurations possibles pour les doigts sous-actionnés, en haut, et leur installation sur la paume, en bas.	40
2.7	Système d'actionnement des doigts.	41
2.8	Illustration schématique du principe de sous-actionnement adopté.	41
2.9	Configurations possibles du doigt.	42
2.10	Les coefficients de friction dans le système de transmission.	45
2.11	Le système de transmission à l'arrière de l'interface et sa schématisation. La poulie pour le réglage de tension peut être déplacée horizontalement afin de bien tendre la courroie.	47
2.12	Le pouce.	48
2.13	Le prototype final de HARRI.	50
2.14	Représentation schématique de l'algorithme de commande.	51
2.15	Les paramètres variables dans les modèles d'admittance : dans la colonne de gauche les amortissements virtuels, dans celle de droite les raideurs virtuelles, respectivement pour le contrôleur de la paume (en haut) et celui des doigts (en bas).	55
2.16	Pourcentage de déplacement achevé par la paume et par les doigts pour des différentes valeurs du gain σ	56
2.17	Représentation de la tension dans les câbles pendant une fermeture libre, à gauche, et lors d'une poignée de main, à droite. La ligne horizontale en pointillé représente la valeur de seuil pour le bloc de sécurité.	57
2.18	Résultats d'une commande suivant la première approche de contrôle du signal du CED, en haut, et d'une commande suivante la deuxième approche de contrôle du même signal, en bas.	59
2.19	Installation expérimentale de HARRI sur le robot KUKA LWR.	61
2.20	La force de serrage peut être mesurée avec un dynamomètre.	62
2.21	Données relatives à une simple poignée de main. Les forces sont exprimées en N , les déplacements en m	65
2.22	Trajectoires de l'interface sur le plan XZ . À gauche, la trajectoire correspondant à la poignée de main représentée à la figure 2.21, à droite la trajectoire correspondant aux mouvements les plus étendus observés au cours de la séance expérimentale.	66
2.23	Résultat d'une commande adaptative : HARRI répond convenablement aux forces externes.	68
3.1	Les trois ressorts sont montés au bout d'un de deux mécanisme de façon que l'on puisse les échanger rapidement : ils sont vissés à la barre horizontale et simplement accrochés au levier.	76
3.2	Schéma de la commande par admittance modifiée pour le test d'identification d'une séquence.	77
3.3	Les quatres objets du deuxième test : le coton, la mousse, la balle anti-stress et la balle de tennis.	80
3.4	Le système de télé-opération pour le test d'identification des objets.	81
3.5	Schéma de la commande par admittance modifiée pour le test d'identification de quatre objets.	82

3.6	Les deux mécanismes à pince composant le système de télé-opération lors de la séance expérimentale. La figure du haut illustre un mécanisme à pince saisissant la balle antistress. La figure du bas représente l'autre côté du système, avec un des participants saisissant l'autre mécanisme.	89
3.7	Le robot Baxter équipé de deux interfaces HARRI.	92
3.8	Les articulations du robot Baxter [Robotics, 2014].	93
3.9	Représentation schématique du système de communication final.	94
3.10	Commande pour l'interaction humain-humain utilisant deux HARRI.	97
3.11	Deux personnes se serrant la main à distance par le biais des deux interfaces HARRI montées sur le robot Baxter.	98
3.12	Groupe 1 : Forces échangées entre les utilisateurs à travers le système de communication.	102
3.13	Groupe 2 : Forces échangées entre les utilisateurs à travers le système de communication.	104
3.14	Groupe 1 : Trajectoires des deux interfaces dans l'espace de travail YZ	106
3.15	Groupe 2 : Trajectoires des deux interfaces dans l'espace de travail YZ	107
3.16	Groupe 1 : Forces Baxter dans le plan YZ	109
3.17	Groupe 2 : Forces Baxter dans le plan YZ	110
3.18	Le mécanisme à rail vertical.	114
3.19	Poignée de main à distance avec les mécanismes à rail vertical.	115
3.20	Groupe 1 : Trajectoires des deux interfaces.	117
3.21	Groupe 2 : Trajectoires des deux interfaces.	118
4.1	Le mécanisme parallèle à cinq barres et à deux degrés de liberté.	127
4.2	Représentation schématique du mécanisme parallèle à cinq barres.	129
4.3	Le dispositif expérimental.	134
4.5	Comparaison entre le premier et le dernier essai pour les huit participants.	138
4.6	Le modèle du mot <i>hello</i> et les distances considérées pour l'analyse.	139
4.7	Progrès des élèves. Chaque participant au test d'apprentissage est représenté par deux colonnes, c'est-à-dire la colonne de gauche et la colonne de droite, correspondant aux écarts du premier et du dernier essai. Les écarts sont mesurés en millimètres.	141
4.8	Changement lettre par lettre. La colonne de gauche représente l'écart du premier essai, tandis que la colonne de droite correspond à l'écart du dernier essai. Ces écarts sont mesurés en millimètres.	142
4.9	Progrès des participants lors du test à blanc. Les deux colonnes, c'est-à-dire la colonne de gauche et la colonne de droite, correspondent aux écarts du premier et du dernier essai. Ces écarts sont mesurés en millimètres.	144
4.10	Évolution de la différence entre le style de référence et les participants lors des deux tests.	145
4.11	Résultat d'un participant au test à blanc.	147
A.1	Le JAMAR recouvert de caoutchouc pour le test.	171
A.2	Densité de probabilité pour l'estimation de la force de serrage lors d'une poignée de main.	173

Liste des extensions multimédias

- La vidéo « Chapitre2.mp4 » présente l’interface haptique HARRI et sa validation expérimentale.
- La vidéo « Chapitre3_1.mp4 » présente le second système de communication avec le mécanisme à pince à un degré de liberté et sa validation expérimentale.
- La vidéo « Chapitre3_2.mp4 » présente le système de communication pour la poignée de main à distance avec deux interfaces haptiques montées sur le robot Baxter.
- La vidéo « Chapitre3_3.mp4 » présente le système de communication final pour la poignée de main à distance composé de deux interfaces haptiques montées sur deux mécanismes à rail vertical.
- La vidéo « Chapitre4.mp4 » présente le mécanisme parallèle à deux degrés de liberté pour l’apprentissage assisté de l’écriture et le set-up expérimentale utilisé.

À Émeline

Avant-propos

Il est coutume, en écrivant l'avant-propos de la thèse, de commencer par remercier le directeur de recherche. Le lecteur peut tout de même se demander si ces quelques mots de remerciement sont effectivement sincères, ou si l'auteur aurait préféré citer d'abord d'autres personnes qui l'ont aidé et soutenu jusqu'à sa réussite.

En ce qui me concerne, la question ne s'est jamais posée. Malgré l'aide incroyable de mes amis, si aujourd'hui j'achève avec succès mon travail, je dois remercier avant tout mon directeur de recherche, Clément Gosselin. Je ne saurais énumérer toutes ses qualités, mais il y en a une que je considère comme fondamentale pour diriger un laboratoire de recherche : faire ressortir le meilleur de ses étudiants. Lorsque l'on commence un doctorat, il faut apprendre à être indépendant et à résoudre les problèmes liés au projet. Tout devient plus facile si l'on a la confiance de son directeur. Alors merci, Clément, de m'avoir fait confiance pendant ces années jusqu'à la fin de mon parcours à l'Université Laval. Merci de votre temps, de votre patience et de votre disponibilité. Merci aussi de m'avoir donné la possibilité de faire partie de cette équipe formidable au sein du laboratoire de robotique de l'Université Laval. Je n'aurais pas pu espérer mieux !

L'un des membres de cette équipe, au côté de qui j'ai eu la chance et le plaisir de travailler pendant mon doctorat, est Thierry Laliberté, un ingénieur tout aussi brillant que patient. Je ne pourrais jamais le remercier suffisamment des conseils, des connaissances et surtout de la disponibilité qu'il a toujours su me donner. Merci Thierry, j'ai beaucoup appris de toi et je t'en serai toujours reconnaissant.

Je remercie sincèrement les professeurs qui ont accepté de lire et corriger ce manuscrit : Denis Laurendeau, Alain Curodeau et Martin Otis. Merci de vos suggestions et de vos commentaires qui m'ont aidé à améliorer la qualité de la thèse pour le dépôt final. Merci aussi à Philippe Cardou, qui a participé à l'évaluation de mon travail lors de mon examen de doctorat et de ma communication orale.

Une pensée spéciale pour Émeline, à qui cette thèse est dédiée. Merci d'abord de ta patience. Sans toi et tes relectures, la qualité de ce manuscrit aurait été beaucoup plus modeste. Ces quelques lignes ne peuvent dire tout ce que tu représentes pour moi, mais je veux que ceux qui lisent sachent que, si aujourd'hui je suis heureux, c'est grâce à toi.

Je veux aussi remercier les autres membres du laboratoire de robotique, en commençant par les professionnels de recherche. J'ai déjà remercié Thierry, mais je ne peux pas oublier Simon. Merci Simon, sans toi, tous mes travaux expérimentaux auraient été beaucoup plus longs! Je remercie aussi Boris de son aide pendant ma première année à l'université Laval. Finalement, une pensée pour tous les membres du laboratoire : merci pour les dîners, les activités sportives et nos échanges d'idées et de connaissances. Mention spéciale à tous ceux qui ont gentiment accepté de participer comme cobayes à mes tests, merci de votre disponibilité!

En conclusion, j'en profite pour saluer et remercier tous les amis que j'ai rencontrés ici à Québec et qui ont rendu mon expérience vraiment inoubliable. Merci à Dany, à Jaime, à Maxim et à Geoffroy pour tous les moments qu'on a partagés et, à ces deux derniers, merci aussi de m'avoir supporté à l'appartement pendant plus de deux ans. Merci à Maurizio et à Saul pour nos soirées italiennes et à Giulia pour nos cafés à l'université. Merci à la COSA et à tous les gens qui font partie de ce groupe génial, merci pour toutes les belles soirées et les activités qu'on a faites ensemble, vous allez me manquer! Une pensée aussi pour Andrea, Marco et pour tous les amis qui m'ont toujours soutenu à distance. Je finis en remerciant ma famille, mon frère et mes parents. Merci de votre soutien immanquable, constant et indispensable, surtout durant mes premiers mois au Québec.

Merci à tous.

Introduction

Le mot *robotique* est défini par l'ATILF (Analyse et Traitement Informatique de la Langue Française) comme l'ensemble des techniques permettant aussi bien la conception et la réalisation de machines automatiques, c'est-à-dire de robots, que l'utilisation de ces machines dans un domaine ou un contexte donné. La robotique est une discipline scientifique très vaste comprenant plusieurs branches et qui peut être employée dans beaucoup d'applications différentes. La télérobotique, qui signifie littéralement robotique à distance, est l'une de ces branches [Preusche, 2008], [Siciliano and Khattib, 2008]. Du point de vue de la terminologie, il est intéressant de noter que d'autres termes tels que télé-opération et télé-manipulation sont souvent utilisés comme synonymes de télé-robotique, bien qu'une légère nuance les distingue. La télé-robotique décrit de façon très générale le contrôle à distance d'un opérateur sur un robot. Lorsque l'on parle de télé-opération, notre attention se porte sur la tâche à accomplir tandis que la télé-manipulation se concentre davantage sur les objets à manipuler à distance. D'un point de vue historique, les premières applications de télé-opération datent des années cinquante [Goertz, 1952], [Goertz, 1954], tandis qu'à partir des années soixante, les recherches tendent davantage à aborder les problèmes liés au retard temporel [Sheridan and Ferrell, 1963], [Ferrell, 1965].

Le contrôle à distance est actuellement utilisé dans diverses applications, par exemple dans le cadre militaire avec les détonateurs de type IED/EOD [Costo and Molfino, 2004], [Nguyen and Bott, 2001], spatial, dont les rover NASA sur Mars constituent un excellent exemple [Wright et al., 2006], ou médical [Srinivasan and Basdogan, 1997], [Okamura, 2004], dont le meilleur exemple est certainement le robot DaVinci permettant des opérations de chirurgie extrêmement complexes et précises [Guthart and Salisbury Jr, 2000], [Gettman et al., 2004]. Deux exemples de robots contrôlés à distance sont illustrés sur la figure 0.1. La télé-opération peut aussi jouer un rôle très intéressant dans le cadre de la communication : un système de télé-opération peut mettre en contact deux personnes qui se trouvent en deux endroits différents en utilisant des

appareils que l'on qualifie d' « haptiques ».



FIGURE 0.1 – Deux exemples de systèmes de télé-opération : à gauche le robot détonateur et à droite le robot médical Da Vinci.

Le mot haptique vient du grec haptomai qui signifie « je touche » et désigne la science du toucher. Au sens large, l'haptique englobe le toucher et les phénomènes kinesthésiques, c'est-à-dire la perception du corps dans l'environnement [Lederman and Klatzky, 2009], [Loomis and Lederman, 1986], [Hatwell et al., 2003]. Bien que l'appareil haptique ne génère pas explicitement de stimuli tactiles, les récepteurs humains sont cependant stimulés et l'on sait qu'ils peuvent répondre aux hautes fréquences (jusqu'à 10000Hz [Shimoga, 1993]) et qu'ils sont sensibles à des déplacements très limités (jusqu'à $2 - 4\mu\text{m}$ de précision [Srinivasan and LaMotte, 1987], [LaMotte and Whitehouse, 1986]). Dans le système nerveux ce sont les fuseaux neuromusculaires, sensibles à l'allongement des muscles, et les organes tendineux de Golgi, qui renseignent sur les positions articulaires, qui jouent un rôle important dans la proprioception statique ainsi que dans la kinesthésie. En théorie ces récepteurs pourraient être stimulés directement afin de produire une sensation haptique [Hannaford and Okamura, 2008], [Siciliano and Khatib, 2008]. Par exemple, une vibration appliquée à un tendon musculaire crée une sensation forte d'allongement du muscle et du mouvement articulaire correspondant chez les humains [Goodwin et al., 1972], [Hayashi et al., 1981]. Dans [Dhillon and Horch, 2005], les auteurs démontrent que des électrodes implantées à l'intérieur de faisceaux individuels de moignons de nerfs périphériques peuvent être stimulées afin de produire des sensations de toucher ou de mouvement référés au membre fantôme de la personne amputée.

Outre l'anatomie et la physiologie, la psychophysique [Bonnet, 1986], [Gescheider, 2013], la science qui s'intéresse aux sens physiologiques tels que la vue, l'ouïe et le toucher (très rarement l'odorat et le goût), est aussi une source très importante pour le dévelop-

pement de la technologie haptique. Cette discipline se base sur les concepts essentiels de seuil de détection, c'est-à-dire la limite à partir de laquelle la personne est capable de détecter une stimulation externe, et de seuil différentiel, soit la limite en dessous de laquelle un individu ne peut plus distinguer deux stimulations. Ces seuils peuvent être déduits en utilisant plusieurs méthodes, dont les plus importantes sont la méthode des limites et la méthode des ajustements [Kaernbach, 1991]. Les études de psychophysique nous permettent d'avoir une meilleure connaissance de nos capacités sensorielles, par exemple celle du doigt humain [Jones, 2014], et donc aussi de répondre à certaines questions concernant les caractéristiques qu'un appareil haptique doit posséder. Ces conditions jouent un rôle important pour le design de tels dispositifs.

Le but d'un appareil haptique est de transmettre une sensation de force ou de contact, ce qui peut être réalisé de différentes façons. Quelle qu'en soit l'application, on évaluera la capacité d'un tel appareil à interagir avec l'utilisateur. Cette capacité, appelée « haptic rendering » en anglais, désigne le rendu de la sensation de force fournie à l'utilisateur humain par cet appareil [Salisbury et al., 2004]. En d'autres mots, on veut que la sensation générée par le dispositif soit la plus réaliste possible et, dans le cas qui nous concerne, que l'on puisse la transmettre à distance. On parle alors d'un système de télé-opération pour la communication haptique à distance.

L'objectif de ce système-ci est de permettre à deux personnes de percevoir la présence de l'autre, de le « toucher », bien qu'ils ne se trouvent pas dans la même pièce, voire dans le même pays. Un bref retour dans le passé nous permet de constater comme, de tous temps, les systèmes de communication ont évolué de concert avec la technologie (Figure 0.2). Il nous aura fallu passer par les messages codés de l'alphabet Morse avant de pouvoir entendre et maintenant voir notre interlocuteur. Les appels vidéo, qui maintenant nous semblent tout à fait normaux, ne sont disponibles au grand public que depuis une dizaine d'années. Les systèmes de communication d'aujourd'hui se basent donc principalement sur le sens de l'ouïe et de la vue mais, afin d'avoir une communication la plus complète et réelle possible, le sens du toucher devrait être également stimulé. Ce sens est en effet largement utilisé et exploité lors des rapports humains. Outre à être essentiel à la création d'un rapport de confiance entre deux personnes, c'est également à travers le toucher qu'une personne peut exprimer son intimité et sa tendresse envers ses proches [Jones and Yarbrough, 1985], [Register and Henley, 1992]. La technologie haptique s'efforce de répondre à ce besoin en améliorant les appareils et les moyens de communication existants ou en en concevant de nouveaux afin que la communication tactile devienne accessible à tous.

Toutefois, le sens du toucher est extrêmement difficile à reproduire dans une application robotique. La raison de sa complexité est la suivante : contrôler un signal haptique signifie gérer une information qui est soumise à la troisième loi de Newton, aussi connue comme loi d'action-réaction [Suzuyama et al., 2006]. Donc, lorsque l'on parle d'haptique, on parle aussi bien de simple détection du contact, un aspect tout de même non négligeable, que de génération d'une réaction appropriée pour un contact donné.



FIGURE 0.2 – L'évolution des technologies de télécommunication.

La perception haptique peut être transmise et reproduite par des objets quotidiens tel qu'un gilet [Mueller et al., 2005], [Cha et al., 2009] ou un téléphone portable [Chang et al., 2002], [Chang and O'Sullivan, 2005] ou bien par des appareils mécaniques conçus à cet effet comme la sonde technologique [O'Brien and Mueller, 2006] ou les prototypes « Feather », « Scent » et « Shaker » [Strong and Gaver, 1996]. Un dernier exemple, simple mais très efficace, de dispositif haptique pour la communication tactile à distance nous est fourni par l'inTouch [Brave and Dahley, 1997], que l'on peut observer sur la figure 0.3. L'objectif principal de ce mécanisme est de créer l'illusion que deux personnes, séparées par une certaine distance, interagissent avec le même objet. Cet objet virtuel est en réalité simulé par l'inTouch qui en reproduit la sensation au toucher.

Notre objectif n'est pas de créer des objets fictifs grâce à la technologie haptique, mais

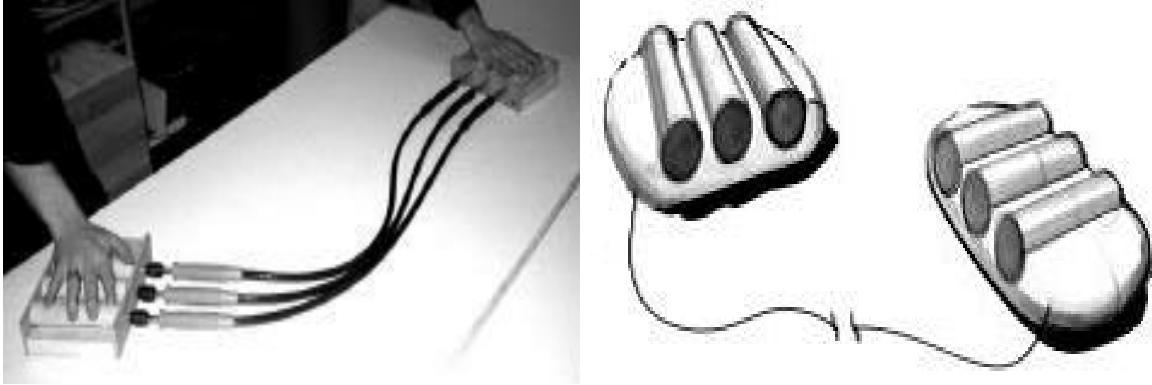


FIGURE 0.3 – Le dispositif haptique inTouch [Brave and Dahley, 1997].

plutôt d'exploiter cette technologie pour construire un dispositif qui fasse office de pont entre deux utilisateurs. Nous désirons donc donner l'impression à deux personnes, séparées par une certaine distance, de pouvoir interagir entre elles comme si elles se trouvaient dans la même pièce. Le but final de ce travail est de créer un système de communication bilatéral composé de deux dispositifs. Ces deux dispositifs pourraient être utilisés par deux personnes se situant à une certaine distance l'une de l'autre. Ils rendraient possible la mise en contact de ces deux individus qui pourraient dès lors se serrer la main en dépit de la distance les séparant. Le système est dit bilatéral car les deux dispositifs sont équipés de capteurs de force mesurant la force externe appliquée par l'utilisateur, et entraînant un retour de force des deux côtés. Dans cette interaction humain-humain, les deux dispositifs se trouvent au même niveau dans la loi de commande. On dépasse donc le concept de « maître » et « esclave » pourtant typique des interactions de type Humain – Robot [Goodrich and Schultz, 2007].

Objectifs de la thèse

Le fil conducteur de ce travail est la communication haptique à distance entre deux personnes. Notre objectif final est de concevoir et réaliser un système de télé-opération bilatéral permettant de reproduire la forme de salut la plus commune entre deux personnes : la poignée de main. Le travail se divise en deux parties principales : d'un côté, la définition et le développement de la loi de commande pour le contrôle du système de télé-opération et, de l'autre, la conception et la réalisation du dispositif haptique qui va être utilisé pour un tel système. Ce dispositif, appelé télé-opérateur, prendra au stade final du travail la forme d'une interface anthropomorphe caractérisée par une paume réactive et des doigts sous-actionnés.

Le premier chapitre de cette thèse est dédié à la loi de commande. Cette loi a été conçue et modifiée pas à pas de façon expérimentale, en commençant par une simple loi de commande en impédance, sans l'utilisation d'aucun capteur de force. Le travail a continué par l'ajout des capteurs et l'ajustement de la loi, afin d'inclure la force exercée par l'utilisateur humain dans la boucle. Une brève validation expérimentale est également incluse pour montrer les capacités de suivi de signal des deux lois de commande.

Le deuxième chapitre est dédié à la conception, au processus de design et à la réalisation de l'interface anthropomorphe. Dans ce chapitre, on analyse également les modifications qu'il convient d'apporter à la commande afin que l'interface produise correctement une poignée de main humain-robot. Un test ainsi que ses résultats seront également présentés dans ce second chapitre. Celui-ci nous permettra, grâce à l'utilisation d'un robot KUKA LWR comme bras robotique, d'étudier la poignée de main dans son ensemble.

Le troisième chapitre se concentre exclusivement sur la communication à distance réalisée au moyen de la technologie haptique. On y démontre que la transmission d'un signal haptique d'un côté à l'autre du système est possible en dépit de l'utilisation de dispositifs très élémentaires. Plusieurs mécanismes, dont la complexité s'accroît au fil des tests, sont présentés. Par la suite, les résultats des-dits tests sont analysés. Le test final est mené avec l'interface haptique anthropomorphe du chapitre 3, à l'aide d'un système qui permet à deux personnes de se serrer la main à distance.

Le dernier chapitre correspond également au premier projet, en ordre temporel, qui a été réalisé pendant ce doctorat. Il s'agit d'un système de télé-opération pour l'apprentissage de l'écriture à distance, que l'on contrôle en utilisant la loi de commande en impédance présentée au chapitre 1. Ce système, validé lors d'une séance expérimentale, est composé de deux mécanismes parallèles à cinq barres qu'on utilise comme outil d'écriture.

Il est important de noter que les contrôleurs et les dispositifs haptiques présentés dans cette thèse ont tous été validés expérimentalement. Les travaux présentés ici ont également été publiés dans des conférences ou des journaux scientifiques, ou sont en passe de l'être.

Chapitre 1

Définition et développement de la loi de commande

Ce premier chapitre aborde le problème de la commande à utiliser lors d’une interaction humain-robot. Notre attention se porte dès le début sur les commandes en force indirectes, parmi lesquelles nous pouvons distinguer la commande par impédance et la commande par admittance. Il existe une nuance légère mais significative entre les deux, tel que cela sera démontré au cours du chapitre. L’objectif est de réaliser et de valider un contrôleur qui puisse nous garantir une interaction sécuritaire et intuitive entre l’utilisateur et le robot. Pour ce faire, l’emploi de capteurs de force est requis et l’utilisation des signaux de force sortant de ces capteurs constitue le nœud principal de notre analyse. Quelques essais expérimentaux seront également présentés afin de mieux illustrer le comportement de la commande et sa réponse aux forces externes.

1.1 Introduction à la commande en force

Lors d’une première approche de la commande d’un manipulateur, les contrôleurs communément abordés en premier lieu sont les contrôleurs en position, qui s’appliquent aux tâches robotiques pour lesquelles on spécifie le mouvement en espace libre de l’effecteur. Ce type de commande n’est toutefois pas applicable pour d’autres applications robotiques, notamment celles où le manipulateur est en contact avec son environnement, sur lequel il exerce certaines forces. Pour ce genre de tâche, un type de commande nous permettant d’asservir directement les forces et non pas les positions est requise : nous parlons donc de commande en force. Si l’on considère l’environnement comme un milieu élastique très rigide, la relation entre les mouvements du manipulateur et les forces de contact s’écrit :

$$\Delta \mathbf{f} = \mathbf{K} \Delta \mathbf{x} \quad (1.1)$$

où \mathbf{K} est la matrice de raideur de l’environnement, dont quelques éléments peuvent être très grands. Ainsi, si les raideurs sont très grandes, de très faibles déplacements $\Delta \mathbf{x}$ vont générer de grandes forces $\Delta \mathbf{f}$. Pour contrôler la force sur l’environnement avec une boucle en position il nous faudrait un modèle parfait de cet environnement ainsi qu’une grande précision de positionnement, raison pour laquelle nous asservirons la force \mathbf{f} [Siciliano and Khatib, 2008].

La commande en force peut être divisée en commande en force indirecte, dénommée également implicite, ou bien en commande en force directe. La différence fondamentale est la suivante : une commande en force indirecte asservit les efforts générés par le manipulateur en gérant les erreurs en position et en orientation à l’effecteur, tandis que dans la commande en force directe on asservit les efforts générés par le manipulateur

en gérant directement les erreurs en force [Siciliano and Khatib, 2008]. Nous pouvons ensuite distinguer entre deux types de commande en force indirecte : la commande par compliance et la commande par impédance/admittance, sur lesquelles nous nous pencherons avec plus d'attention dans les paragraphes à venir.

Cette thèse est présentée dans le cadre de la communication haptique à distance. Les dispositifs haptiques ici présentés, ainsi que les systèmes de télé-opération que ceux-ci forment, sont pensés et conçus pour une interaction avec une ou plusieurs personnes. Ceci implique un échange continu de forces entre les manipulateurs et l'environnement. Pour cette raison nous utilisons une loi de commande en force du type indirect. Nous utiliserons plus précisément une commande par impédance au stade initial du projet, avant de passer par la suite à une commande par admittance.

La commande par impédance et la commande par admittance partagent la même équation de base mais diffèrent dans leurs implémentations et dans leurs domaines d'application. La commande par impédance accepte un déplacement en entrée et répond avec une force en sortie, calculée selon le modèle dynamique défini, tandis que la commande par admittance accepte une force en entrée et réagit avec un déplacement en sortie, calculé encore selon le modèle dynamique employé [Hayward and MacLean, 2007], [Van der Linde et al., 2002].

Le choix de la commande à utiliser dépend de l'application que l'on veut développer. La commande par impédance est choisie lorsque l'utilisateur interagit avec un système qui a une faible inertie et où la friction est limitée. Dans ce cas-ci, l'utilisateur est capable d'imposer un mouvement au système qui réagit en conséquence avec une force en sortie, selon le modèle dynamique imposé. Cela permet également de réaliser une économie notable en rendant superflu l'achat de capteurs de force. Au contraire, si le système d'interface possède une très grande inertie et si la friction est significative, le contrôleur par impédance devient dès lors difficilement applicable. Il convient alors d'adopter une commande par admittance, laquelle nous permet de manier facilement des systèmes massifs avec un effort moindre [De Schutter et al., 1998], [Colgate et al., 2003], [Lecours, 2012], [Lecours and Gosselin, 2013].

Nous allons maintenant analyser en détail les deux contrôleurs que nous utiliserons au cours de cette thèse : tout d'abord le contrôleur par impédance, puis par la suite celui par admittance. À chaque étape, une application pratique est présentée et analysée.

1.2 Commande par impédance

La commande par impédance a été introduite au milieu des années 1980 par Hogan [1985a], [Hogan, 1985b], [Hogan, 1985c] en réponse au besoin croissant d'une commande rendant possible une interaction efficace entre le robot et son environnement. L'idée à la base de cette commande est la modification de la dynamique virtuelle d'un robot au point d'application : le plus souvent on lui impose le comportement d'un système masse-ressort-amortisseur. L'équation générale de la commande par impédance est la suivante :

$$\mathbf{f} = \mathbf{M}_v \Delta \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_v \Delta \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_v \Delta \mathbf{x} \quad (1.2)$$

avec

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) \quad (1.3)$$

où $\ddot{\mathbf{x}}$, $\dot{\mathbf{x}}$ et \mathbf{x} représentent respectivement les vecteurs de position réelle, de vitesse réelle et d'accélération réelle du manipulateur, tandis que $\ddot{\mathbf{x}}_d$, $\dot{\mathbf{x}}_d$ et \mathbf{x}_d représentent respectivement la position, la vitesse et l'accélération désirées. \mathbf{M}_v fait référence à la matrice d'inertie virtuelle, \mathbf{K}_v à la matrice de raideur virtuelle et \mathbf{C}_v à la matrice d'amortissement virtuelle. Le vecteur \mathbf{f} représente la force d'interaction.

La commande dans l'espace articulaire est obtenue en utilisant le principe des travaux virtuels :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{f} \quad (1.4)$$

où \mathbf{J} est la matrice jacobienne du manipulateur et $\boldsymbol{\tau}$ est le vecteur des efforts articulaires. En combinant les équations 1.2 et 1.4, on déduit la loi de commande du manipulateur :

$$\boldsymbol{\tau}_c = \mathbf{J}^T (\mathbf{M}_v \Delta \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_v \Delta \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_v \Delta \mathbf{x}) \quad (1.5)$$

où $\boldsymbol{\tau}_c$ est le vecteur d'efforts de commande articulaires.

Étant donné que la plupart des mesures de position proviennent des articulations du manipulateur, nous avons besoin de la solution du problème géométrique direct afin de pouvoir expliciter le terme $\Delta \mathbf{x}$ en fonction des positions articulaires $\boldsymbol{\theta}$, c'est-à-dire :

$$\mathbf{x} = \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}) \quad (1.6)$$

où \mathbf{h} représente la solution au problème géométrique direct.

Pour le terme $\Delta \dot{\mathbf{x}}$ on a de manière évidente :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (1.7)$$

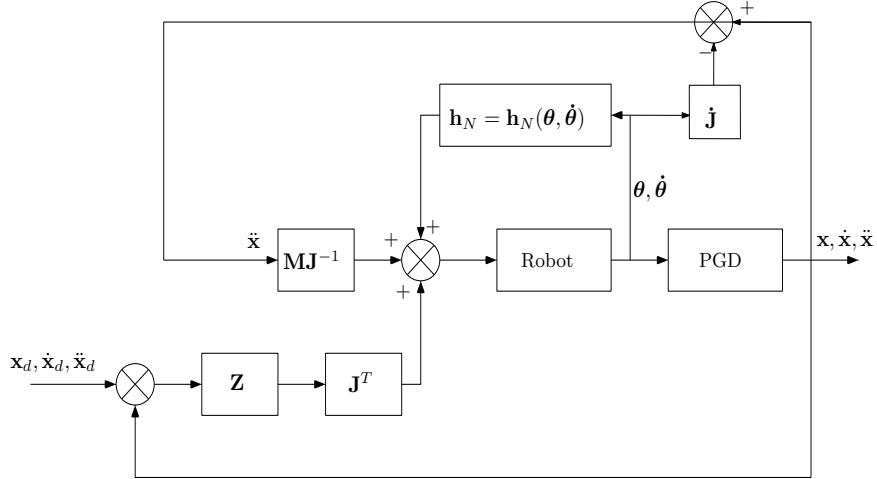


FIGURE 1.1 – Schéma de commande par impédance cartésienne

et si l'on dérive la dernière équation :

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}. \quad (1.8)$$

À noter que le calcul explicite de la dérivée temporelle de la matrice jacobienne $\dot{\mathbf{J}}$ est normalement très compliqué ainsi que la mesure de $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ qui est souvent très bruitée. Selon les cas, des approximations ou des simplifications de la loi de commande peuvent être effectuées afin de résoudre ces problèmes.

La forme complète de la loi de commande comprend également le terme de compensation statique et dynamique du manipulateur $\mathbf{h}_N(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$. Le modèle dynamique général d'un manipulateur est le suivant :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}_N(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (1.9)$$

où \mathbf{M} est la matrice d'inertie généralisée du manipulateur et $\boldsymbol{\tau}$ est le vecteur des efforts articulaires. ce qui donne dans l'espace cartésien :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}\mathbf{J}^{-1}[-\dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \ddot{\mathbf{x}}] + \mathbf{h}_N(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}). \quad (1.10)$$

On rajoute le terme de commande donnant le comportement désiré au manipulateur et l'on obtient la loi de commande en impédance pour un système général à plusieurs degrés de liberté :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}\mathbf{J}^{-1}[-\dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \ddot{\mathbf{x}}] + \mathbf{h}_N(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{J}^T(\mathbf{M}_v\Delta\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_v\Delta\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_v\Delta\mathbf{x}). \quad (1.11)$$

À noter que la commande ne nécessite pas, jusqu'à présent, de retour d'information en force, bien que l'ajout d'un capteur permettrait de se passer du terme $\ddot{\mathbf{x}}$ en entrée du

modèle dynamique. L'effort à l'effecteur est donné par l'équation 1.2 d'où l'on déduit :

$$\ddot{\mathbf{x}} = \ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{M}_v^{-1}(\mathbf{C}_v \Delta \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_v \Delta \mathbf{x} - \mathbf{f}). \quad (1.12)$$

Finalelement la loi de commande globale devient :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}\mathbf{J}^{-1}[-\dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{M}_v^{-1}(\mathbf{C}_v \Delta \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_v \Delta \mathbf{x} - \mathbf{f})] + \mathbf{h}_N(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{J}^T(\mathbf{M}_v \Delta \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_v \Delta \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_v \Delta \mathbf{x}). \quad (1.13)$$

Cette dernière commande est souvent considérée comme **la** commande en force des manipulateurs [Siciliano and Villani, 1999].

1.2.1 Système de télé-opération bilatéral avec une commande par impédance

La télé-opération est l'extension de la capacité de perception et de manipulation d'une personne [Sheridan, 1989] : dans le système de télé-opération classique, l'utilisateur humain contrôle le téléopérateur « maître » tandis que le télé-opérateur « esclave » exécute la tâche. La télé-opération bilatérale est une application particulière de télé-opération : « si l'esclave possède des capteurs de force, alors il peut transmettre au maître les forces de réaction mesurées pendant l'exécution de la tâche, ce qui va faire partie des couples en entrée du maître, et le télé-opérateur est dit bilatéral » [Hokayem and Spong, 2006].

Le système de télé-opération que nous présentons ici est un système bilatéral dans lequel, toutefois, nous ne désignerons ni manipulateur maître ni manipulateur esclave. Les deux manipulateurs formant le système ont été conçus afin d'être utilisés chacun par son propre utilisateur, le but étant de mettre en contact ces deux utilisateurs afin de leur donner l'impression de communiquer ou de travailler ensemble à distance, comme s'ils se trouvaient dans la même pièce.

Nous allons alors commencer avec un système très simple, contrôlé avec une loi de commande par impédance. Ce système est composé de deux télé-opérateurs, le télé-opérateur A et le télé-opérateur B , où chaque télé-opérateur n'est qu'un bras de levier à un degré de liberté, actionné par un servomoteur (Fig. 1.2). De par sa simplicité, ce système est contrôlable directement dans le domaine articulaire. Les deux variables sont alors θ_A et θ_B , où θ_i — avec $i = A, B$ — est la valeur d'angle du bras de levier i par rapport à sa position initiale, c'est-à-dire la position horizontale. On désire que le mécanisme A et le mécanisme B se trouvent, à tout moment, à la même position, ce

que l'on obtient en définissant :

$$\begin{aligned}\theta_{d,A} &= \theta_B, \\ \theta_{d,B} &= \theta_A\end{aligned}\tag{1.14}$$

où $\theta_{d,i}$ est la position désirée du mécanisme i . En d'autres mots, la position désirée d'un mécanisme correspond à la position réelle de l'autre mécanisme et vice-versa.

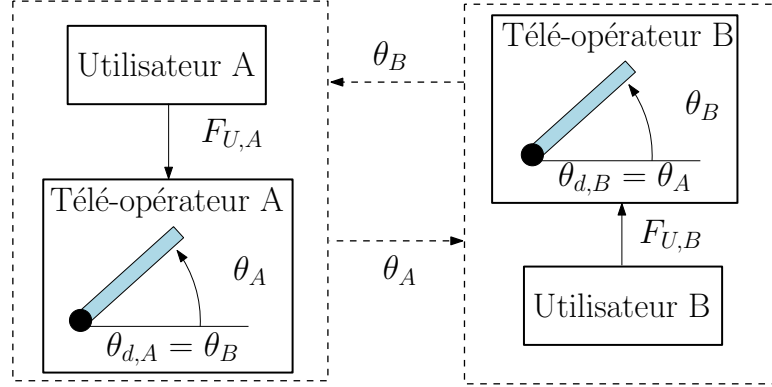


FIGURE 1.2 – Schéma du système de télé-opération composé de deux bras de levier.

En utilisant un contrôleur par impédance, on calcule le couple à envoyer à chaque moteur τ_i , $i = A, B$, comme suit :

$$\tau_i = M_v(\ddot{\theta}_{d,i} - \ddot{\theta}_i) + C_v(\dot{\theta}_{d,i} - \dot{\theta}_i) + K_v(\theta_{d,i} - \theta_i) + h(\dot{\theta}_i, \theta_i).\tag{1.15}$$

Comme nous n'utilisons pas de capteur de force à cette étape-ci et la mesure de $\ddot{\theta}$ étant trop bruitée en temps réel, on simplifie la loi de commande en imposant à M la valeur nulle. De plus, comme les effets liés à la dynamique du système peuvent être négligés, le terme $h(\dot{\theta}, \theta)$ est réduit au terme de compensation de gravité $g(\theta)$. La loi de commande devient :

$$\tau_i = C_v(\dot{\theta}_{d,i} - \dot{\theta}_i) + K_v(\theta_{d,i} - \theta_i) + g(\theta_i)\tag{1.16}$$

où

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_{d,A} &= 0, \\ \dot{\theta}_{d,B} &= 0, \\ \theta_{d,A} &= \theta_B, \\ \theta_{d,B} &= \theta_A.\end{aligned}\tag{1.17}$$

Les coefficients de gain C_v et K_v sont déduits de façon expérimentale, tel que cela sera explicité dans la prochaine section.

1.2.2 Expérimentations

Afin d'étudier le comportement du système et de choisir les bons coefficients de gain, un bref test est réalisé. Normalement le système de télé-opération devrait être utilisé par deux utilisateurs mais, pour ce test-ci, la loi de commande est modifiée en introduisant le rôle de mécanisme maître et de mécanisme esclave : une entrée virtuelle est alors imposée au mécanisme maître afin d'étudier la capacité du mécanisme esclave à suivre cette trajectoire (Fig. 1.3). Cette dernière est sinusoïdale, en outre, sa fréquence et son intensité nous sont connues :

$$\theta(t) = I \sin(f\pi t) \quad (1.18)$$

où I est une constante, tandis que pour la fréquence f huit différentes valeurs sont employées : $f = [1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8, 12, 16] \text{ Hz}$.

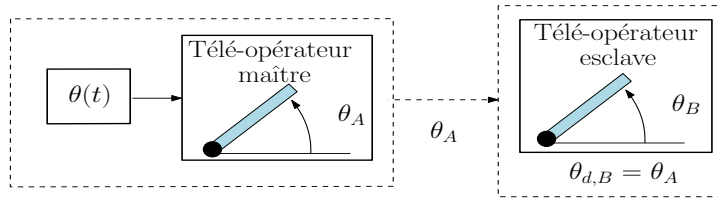


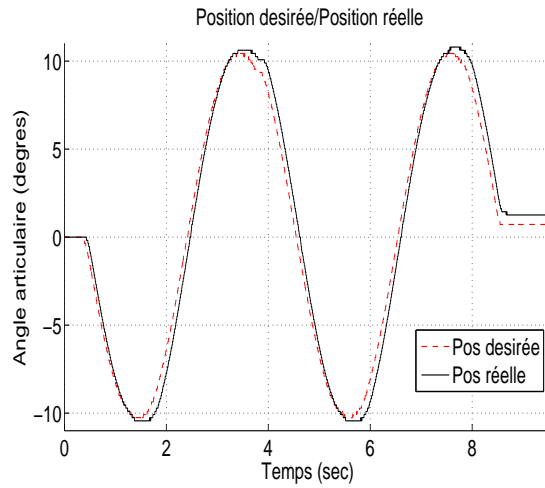
FIGURE 1.3 – Schéma du système de télé-opération composé de deux bras de levier.

Nous augmentons progressivement la fréquence afin de tester les limites du système : plus la valeur de la fréquence augmente et plus il devient difficile pour le mécanisme esclave de suivre son maître (fig. 1.4). Le paramètre considéré pour cette analyse est la différence de phase en degrés $\psi(t)$, que l'on calcule comme suit :

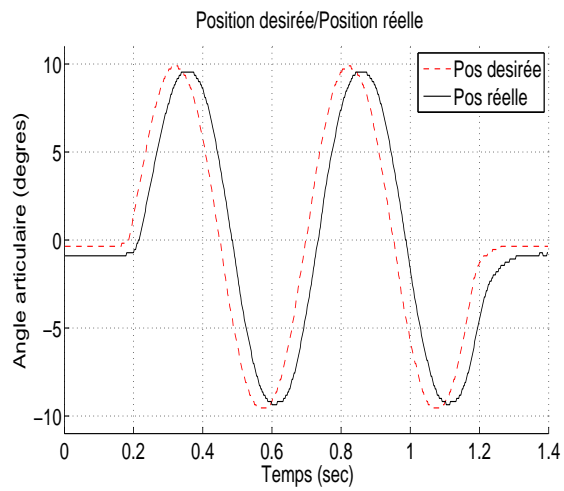
$$\psi(t) = 360f\Delta t \quad (1.19)$$

où Δt est le retard temporel et f la fréquence de mouvement. Nous calculons dans un premier temps le retard temporel entre les deux signaux. Pour obtenir une valeur acceptable, ce retard est mesuré sur trois points différents de chaque graphe. Le résultat est représenté sur échelle logarithmique de base 2. Nous illustrons ici la partie conclusive du travail concernant l'ajustement final des coefficients de la loi de commande. Dans un premier temps, nous avons défini une plage de valeurs possibles pour les deux gains, C_v et K_v . Le travail se limite désormais à chercher parmi les valeurs dans cette plage celles qui garantissent la meilleure réponse du système.

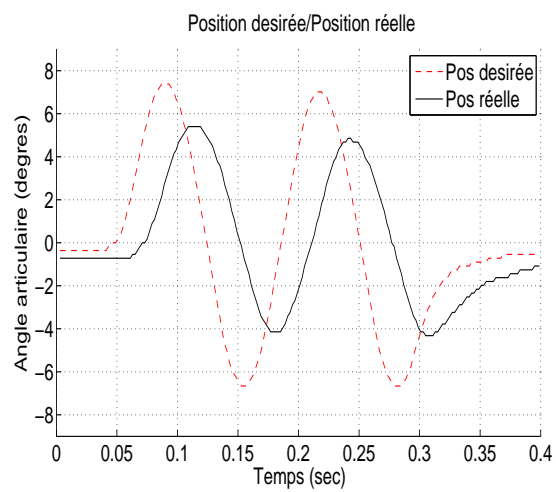
Nous définissons d'abord le coefficient K_v , c'est-à-dire la précision de la commande en position (fig. 1.5). Nous remarquons comment, en utilisant un gain trop faible, soit $K_v = 0.5$, le mécanisme esclave n'arrive pas à suivre correctement son maître, surtout



(a) $f = \frac{1}{2}$



(b) $f = 4$



(c) $f = 16$

FIGURE 1.4 – Suivi de position pour $K_v = 0,85$ et $C_v = 0,025$, soit les valeurs qui seront ensuite choisies pour le système.

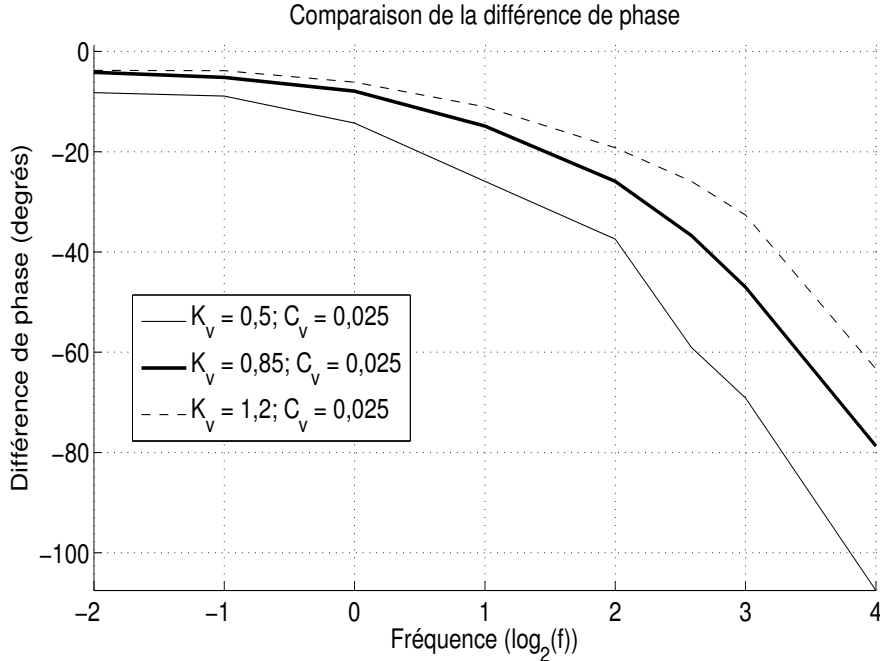


FIGURE 1.5 – Différence de phase en fonction du coefficient de gain K_v .

lors de mouvements très rapides. En se basant uniquement sur le résultat illustré sur la figure 1.5, le gain $K_v = 1.2$ semble donner les meilleures performances : bien qu’au premier abord cela ne soit pas faux, une perte de stabilité est malgré tout occasionnée lors des gains trop élevés. Afin d’éviter des oscillations inopportunes et potentiellement dangereuses, une valeur plus petite est donc choisie, notamment $K_v = 0.85$, avec laquelle l’on continue l’analyse, en concentrant désormais notre attention sur le coefficient C_v qui, au cours de la première partie, a toujours été égal à 0.025.

Nous vérifions qu’en augmentant et en diminuant ce coefficient certains problèmes apparaissent. Si la valeur d’amortissement est trop petite, le mécanisme esclave ne suit pas bien le mécanisme maître car les oscillations ne sont pas totalement dissipées. Donc le mécanisme esclave continue à bouger vers sa position d’équilibre même si le mécanisme maître est déjà immobile, ce qui n’est pas désiré (Fig. 1.6).

Au contraire en augmentant trop le coefficient C_v , le mécanisme esclave ne pourra plus bien suivre son maître, ce qui peut être observé sur la figure 1.7, où l’augmentation de la différence de phase est bien visible. L’amortissement étant très élevé, le mécanisme esclave ne peut pas pivoter à la même vitesse que le mécanisme maître.

Il est important de remarquer que les valeurs des coefficients de gains servent seulement à nous donner une idée du comportement du système en augmentant ou en diminuant

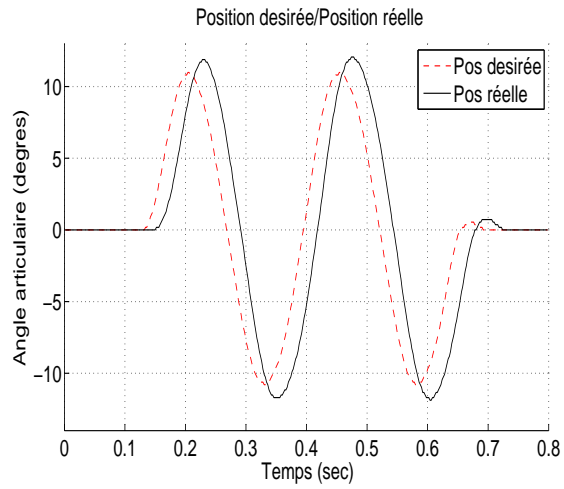


FIGURE 1.6 – Test avec $K_v = 0,85$, $C_v = 0,015$ et $f = 8$. Le mécanisme esclave dépasse la trajectoire indiquée par le mécanisme maître car l'amortissement est trop faible.

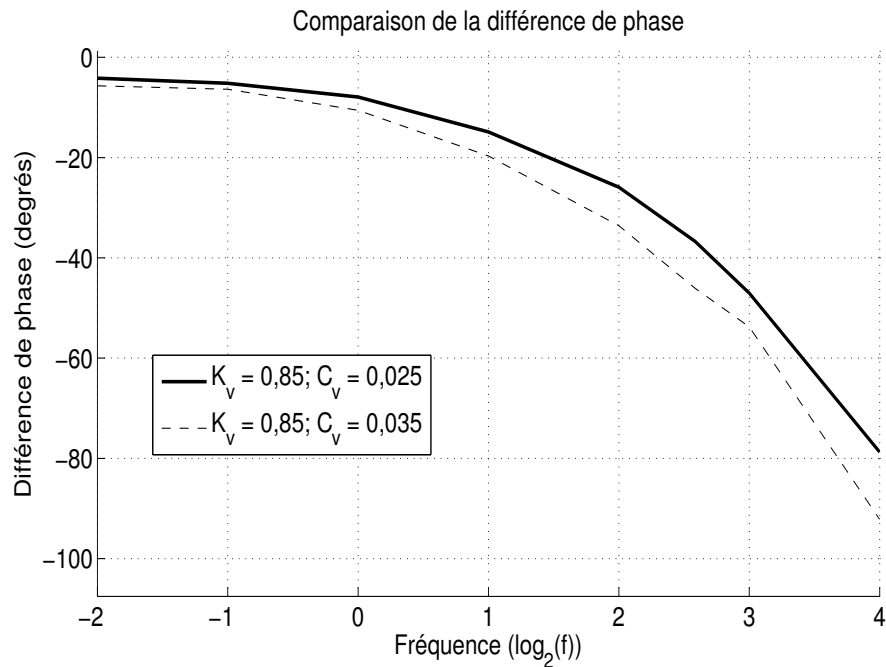


FIGURE 1.7 – Différence de phase pour deux valeurs d'amortissement différentes.

certaines paramètres. La valeur de K_v , ou bien de C_v , a en soi peu de signification, étant donné que celles-ci dépendent de plusieurs facteurs, tel que par exemple le moteur utilisé.

Il est également important de noter que le contrôleur par impédance est employé ici comme un simple contrôleur pour le suivi de position. Pour ce genre de tâche, d'autres contrôleurs peuvent être employés, notamment les contrôleurs PID. Étant donné que notre objectif est de travailler avec les commandes en force, nous avons choisi d'utiliser ce type de commande dès le début du projet.

1.2.3 Conclusion

Cette première section du chapitre 1 a débuté par une présentation de la commande par impédance, laquelle fut ensuite utilisée dans une application de télé-opération bilatérale, dont l'objectif était d'avoir deux dispositifs qui bougeaient l'un en fonction de l'autre. À cette étape du travail le dispositif était encore élémentaire, étant essentiellement constitué d'un bras de levier à un degré de liberté. Malgré sa simplicité, ce mécanisme nous a été des plus utiles puisqu'il nous a permis de nous concentrer davantage sur la commande, avant d'aborder des problèmes plus complexes tels que le design et la gestion de mécanismes plus élaborés.

En suivant la même stratégie, le dispositif à un degré de liberté est de nouveau mis à profit dans la prochaine étape, décrite dans la section 1.3, au cours de laquelle une commande par admittance est introduite et développée. Cette étape diffère uniquement de par l'ajout d'un capteur de force, requis pour la détection des intentions humaines.

Le contrôleur par impédance est également employé dans un autre projet, toujours dans le cadre de la communication à distance, qui sera présenté au chapitre 4.

1.3 Commande par admittance

Tel que nous l'avons déjà mentionné au début de ce chapitre, la commande par admittance fait partie des commandes en force, tout comme la commande par impédance avec laquelle elle partage la même équation de base (eq. 1.2). En effet, il arrive souvent que dans la littérature le contrôleur par admittance et le contrôleur par impédance soient confondus [Ikeura and Inooka, 1995], [Kosuge and Kazamura, 1997], [Ikeura et al., 1997], [Ikeura et al., 2002], [Tsumugiwa et al., 2002]. Nous parlons d'une commande par admittance lorsque le contrôleur reçoit en entrée un signal en force, mesuré par un

capteur de force qui devient donc indispensable dans la boucle, en réagissant avec une position où une vitesse à la sortie.

Pour un système à un degré de liberté la commande en admittance peut être ainsi écrite :

$$f_H = m(\ddot{x} - \ddot{x}_0) + c(\dot{x} - \dot{x}_0) + k(x - x_0) \quad (1.20)$$

où f_H est la force d'interaction appliquée par l'utilisateur humain, m , c et k sont respectivement la masse virtuelle, l'amortissement virtuel et la raideur virtuelle, x_0 , \dot{x}_0 et \ddot{x}_0 sont la position, la vitesse et l'accélération désirées et x , \dot{x} et \ddot{x} la position, la vitesse et l'accélération réelles.

L'objectif de cette première application est de reproduire un mouvement libre. La position, la vitesse et l'accélération désirées et la raideur virtuelle sont alors définies comme étant égales à zéro. L'équation d'admittance se simplifie donc comme suit :

$$f_H = m\ddot{x} + c\dot{x}. \quad (1.21)$$

La trajectoire que le robot doit suivre peut être prescrite comme étant une position ou une vitesse désirée, chaque approche ayant ses avantages et ses inconvénients. Dans le domaine de Laplace, la vitesse désirée peut être écrite comme suit :

$$\dot{X}_d(s) = \frac{F_H(s)}{ms + c} = \frac{F_H(s)/c}{\frac{m}{c}s + 1} \quad (1.22)$$

tandis que la position de référence serait :

$$X_d(s) = \frac{F_H(s)}{s(ms + c)} \quad (1.23)$$

où s est la variable de Laplace et $X(s)$, $\dot{X}(s)$ $F_H(s)$ sont les transformées de Laplace de x , \dot{x} et f_H , respectivement.

Un rétroaction en vitesse a été utilisée dans d'autres applications de prototypes d'assistance [Duchaine and Gosselin, 2007], [Ikeura and Inooka, 1995], [Lecours et al., 2012], [Tsumugiwa et al., 2002], ce qui représente l'avantage d'un comportement libre, étant donné qu'il n'impose pas de référence fixe. En revanche, la commande en vitesse peut entraîner un problème de dérive qui n'aurait pas lieu, ou du moins de façon limitée, en imposant la position. À titre d'exemple, si le système était soumis à la force de gravité, celle-ci pourrait amener l'articulation à se déplacer lentement et indéfiniment.

Pour contrôler le dispositif haptique dans le système de télé-opération, une commande par admittance avec une rétroaction en vitesse a été initialement mise en œuvre. Pour

ce faire, la vitesse désirée est discrétisée avec la méthode de Tustin [Franklin et al., 1986] et peut être écrite tel que :

$$\dot{x}_d(t) = \frac{f_h(t) - c\dot{x}_d(t-1)}{m}T_s + \dot{x}_d(t-1) \quad (1.24)$$

où $f_H(t)$ est la force d'interaction au pas de temps t , $\dot{x}_d(t)$ est la vitesse désirée au pas de temps t , T_s est la période d'échantillonnage et $\dot{x}_d(t-1)$ est la vitesse désirée au pas de temps $t-1$. Au lieu de la vitesse désirée, la vitesse mesurée au pas de temps $(t-1)$, soit $\dot{x}^*(t-1)$, pourrait être employée. Le choix de la vitesse désirée est justifié car elle permet d'avoir moins de bruit dans la boucle, ce que le choix de la vitesse mesurée risquerait de provoquer, et de pouvoir définir des gains plus faibles dans le contrôleur. En effet, en utilisant une petite période d'échantillonnage, la différence entre vitesse réelle et vitesse mesurée serait très faible, d'où le besoin de gains plus élevés, ce qui pourrait conduire à des situations instables [Lecours, 2012].

La commande par admittance avec une rétroaction en vitesse donne de bons résultats, car le suivi de la trajectoire désirée se fait plutôt bien. Toutefois cette approche ne nous permet pas d'obtenir un système très raide, ce qui serait pourtant préférable pour l'application que nous souhaitons en faire. Si d'un côté le dispositif est très précis et se déplace facilement avec ce type de commande, de l'autre il n'arrive pas à retourner une force conséquente, ce qui est cependant crucial pour la communication de force à distance : le système ne renverrait pas en effet un retour de force réaliste. Pour cette raison, après avoir essayé brièvement la commande avec une rétroaction en vitesse, nous opterons pour une commande avec une rétroaction en position, laquelle fut testée avec succès, tel que nous le démontrerons dans la suite de ce chapitre.

Pour ce faire, l'option la plus simple est d'ajouter un intégrateur à la suite du modèle d'admittance décrit ci-dessus, afin de transformer la vitesse désirée en position désirée. Cependant, dans la future application de la commande par admittance, cette solution ne sera plus suffisante. Considérons, par exemple, l'interface haptique anthropomorphe qui constituera le système final pour la poignée de main robotique. Cette interface doit réagir aux forces externes et se déplacer convenablement mais, lorsque l'utilisateur relâche la pression exercée, elle devrait retourner à sa position initiale. Afin que cela soit réalisable, un terme qui ramène l'interface au point de départ est nécessaire. Il s'agit de la raideur k . Considérons alors l'expression suivante :

$$f_H = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx. \quad (1.25)$$

Dans le domaine de Laplace, celle-ci peut s'écrire comme suit :

$$X_d(s) = \frac{F_H(s)}{ms^2 + cs + k}. \quad (1.26)$$

Toujours en utilisant la méthode de Tustin, on peut obtenir la position désirée discrète du système, qui peut être écrite comme suit :

$$x_d(t) = \frac{1}{\Lambda} [T_s^2 F_H + \Theta x_d(t-1) + \Gamma x_d(t-2)] \quad (1.27)$$

où T_s est toujours la période d'échantillonnage et t le pas de temps, et où

$$F_H = f_H(t) + 2f_H(t-1) + f_H(t-2), \quad (1.28)$$

$$\Lambda = 4m + 2T_s c + T_s^2 k, \quad (1.29)$$

$$\Theta = 2(4m - T_s^2 k), \quad (1.30)$$

$$\Gamma = 4m - 2T_s c + T_s^2 k. \quad (1.31)$$

Afin d'avoir une meilleure réponse du système, les paramètres c , m ou k peuvent être définis comme des paramètres variables, en tenant compte de la vitesse, de la force externe ou de l'accélération du mécanisme. Nous parlons alors de commande par admittance variable, qui est présentée dans la prochaine section.

1.3.1 Admittance variable

La commande par admittance variable a pour objectif principal de simplifier l'interaction entre l'utilisateur humain et le dispositif haptique, afin d'aider ce premier à mieux accomplir la tâche demandée.

Différentes commandes par admittance variable ont été proposées dans la littérature. L'approche typique est d'ajuster le coefficient d'amortissement conformément aux paramètres choisis : cela peut être la vitesse [Ikeura and Inooka, 1995], la dérivée de la force [Duchaine and Gosselin, 2007], l'estimation de la raideur de l'utilisateur [Tsumugiwa et al., 2002] où la minimisation d'une fonction définie pour la tâche [Ikeura et al., 2002]. Si l'on cherche à reproduire une interaction plus précise, on peut alors décider de varier l'amortissement et la masse en fonction de la vitesse et de l'accélération [Le-cours et al., 2012], ce qui nous permet de déduire les intentions de l'utilisateur humain. Une autre approche, présentée à la fin des années quatre-vingt-dix par [Dubey et al., 1997], propose au contraire de faire varier aussi bien l'amortissement que la raideur du système en fonction de la vitesse et de la force.

Dans cette première version de la commande par admittance, on cherche à reproduire un mouvement libre du mécanisme, donc la raideur virtuelle est définie égale à zéro. En ce qui concerne la masse, et dans le cadre de notre application, une masse variable n'aurait aucun effet notable sur les performances finales, étant donné que les déplacements que nous souhaitons faire exécuter à notre mécanisme sont assez limités. De plus, la masse de notre dispositif étant très petite — nous parlons ici d'appareils d'à peine un kilogramme — l'utilisation d'une masse variable perd de son intérêt. Néanmoins, nous avons réalisé quelques essais afin de prouver l'incidence de la masse variable sur la performance du système. Les résultats de ces essais nous ont amenés à opter pour l'utilisation d'une valeur constante. En revanche, un amortissement virtuel variable, dépendant directement de la force appliquée par l'utilisateur sur l'interface, nous donne un système rendant possible des déplacements faciles et des freinages rapides. En résumé, la première version de la commande par admittance variable employée dans cette thèse présente un amortissement variable, une masse constante et une raideur nulle. Le paramètre variable C_v est donc ajusté comme suit :

$$c = c_{max} - \beta |f_H| \quad (1.32)$$

où

$$\beta = \frac{c_{max} - c_{min}}{f_{H,max}} \quad (1.33)$$

et où c_{max} et c_{min} représentent respectivement la valeur maximale et minimale que peut prendre l'amortissement. Ces valeurs sont calculées et ajustées expérimentalement, tout comme $f_{H,max}$ qui correspond à la limite de force mesurée par le capteur. À noter que cette limite n'est pas forcément la limite physique du capteur de force mais pourrait tout à fait être une valeur que l'on choisit afin de mieux contrôler le système, tel que c'est effectivement le cas.

1.3.2 Le capteur de force

Les capteurs de force sont indispensables dans une loi de commande par admittance, car ils nous permettent de déduire les intentions humaines et de faire réagir le système en conséquence [Colgate et al., 2003]. Un capteur de force peut être très coûteux, même s'il est possible de trouver sur le marché des capteurs à un très bon prix.

Une haute précision des mesures de la force d'interaction n'étant pas nécessaire, nous commençons à travailler avec une cellule de charge très simple et peu coûteuse telle que

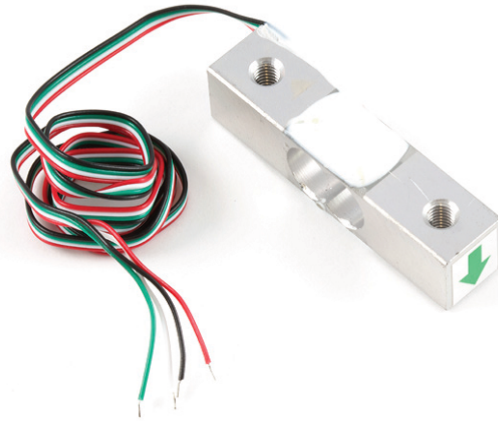


FIGURE 1.8 – Le capteur de force utilisé dans cette thèse : 3134 Micro Load Cell (0-20kg) - CZL635 (Phidgets).

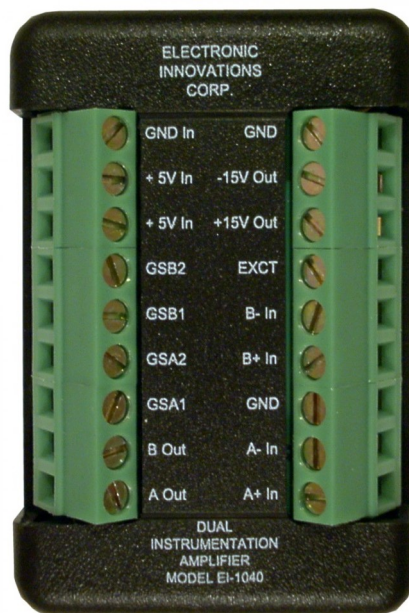


FIGURE 1.9 – L'amplificateur *EI1040* (LabJack).

celle illustrée à la figure 1.8. Cette cellule de charge est une jauge de déformation : la force externe est déduite à partir de la déformation entre les deux extrémités.

Le signal mesuré par le capteur est très faible et une amplification du signal est donc nécessaire. Cela se fait au moyen de l'amplificateur *EI1040*, illustré à la figure 1.9.

Dans l'ensemble cette cellule de charge est très performante, et ce en dépit de son coût dérisoire (moins de 10\$). En revanche, une attention particulière est requise au sujet du câblage entre les capteurs, l'amplificateur et la boîte d'alimentation. En effet, l'ajout

de certaines protections aux fils préexistants s'avère nécessaire afin d'éviter des bruits inopportuns pouvant se révéler des entraves à la bonne transmission du signal.

1.3.3 Système de télé-opération bilatéral avec une commande par admittance

Le système de télé-opération bilatéral contrôlé par une loi de commande par admittance est représenté schématiquement à la figure 1.10. Tel que nous pouvons aisément l'observer, les deux téléopérateurs sont dépendants l'un de l'autre, étant donné que la force exercée par un utilisateur sur n'importe lequel des dispositifs affecte directement et de la même façon les deux côtés du système. Cette force externe est mesurée par la cellule de charge, présentée à la section précédente, qui est intégrée au dispositif. Le signal de force sortant de la cellule ne peut cependant être utilisé directement, en raison du bruit et des valeurs de force potentiellement trop élevées qu'il pourrait atteindre. Pour cette raison un bloc de filtrage est ajouté. Le même bloc impose également des limites maximales absolues au signal. Le signal de force, maintenant filtré, est donc envoyé au modèle d'admittance (eq. 1.24). Le signal sortant du bloc « modèle d'admittance » est un signal de vitesse mais le contrôle direct de celui-ci, tel que nous l'avons déjà mentionné, ne permet pas d'obtenir le comportement raide du système que nous souhaitons. Un bloc intégrateur est donc ajouté et les deux signaux de vitesse, l'un provenant du modèle d'admittance du téléopérateur *A* et l'autre du modèle d'admittance du téléopérateur *B*, sont intégrés et envoyés au bloc pour le suivi de position. Ceci peut être effectué par un contrôleur en position traditionnel, tel qu'un contrôleur PID, ou à l'aide d'un contrôleur en force, comme la commande par impédance présentée à la section 1.2. Le dispositif se comporte désormais comme un système ressort-amortisseur en suivant la trajectoire désirée calculée à travers le modèle d'admittance.

L'introduction du contrôleur en admittance sert à remplacer le signal de l'encodeur, une stratégie de travail qui ne peut pas être suivie en cas de mécanisme non rétro-commandable. Une transmission est définie comme étant non rétro-commandable si une force ou un couple appliqué à la sortie peut effectivement être utilisé pour faire changer son entrée. En général, les mécanismes complexes ou qui emploient des moteurs avec un grand rapport de réduction ne possèdent pas cette caractéristique. Dès lors, les capteurs de force deviennent indispensables pour une interaction intuitive et sécuritaire.

Le dispositif utilisé ici afin de tester le contrôleur en admittance est tout simple, il ne s'agit que d'un bras de levier à un degré de liberté qui est actionné par un moteur avec un

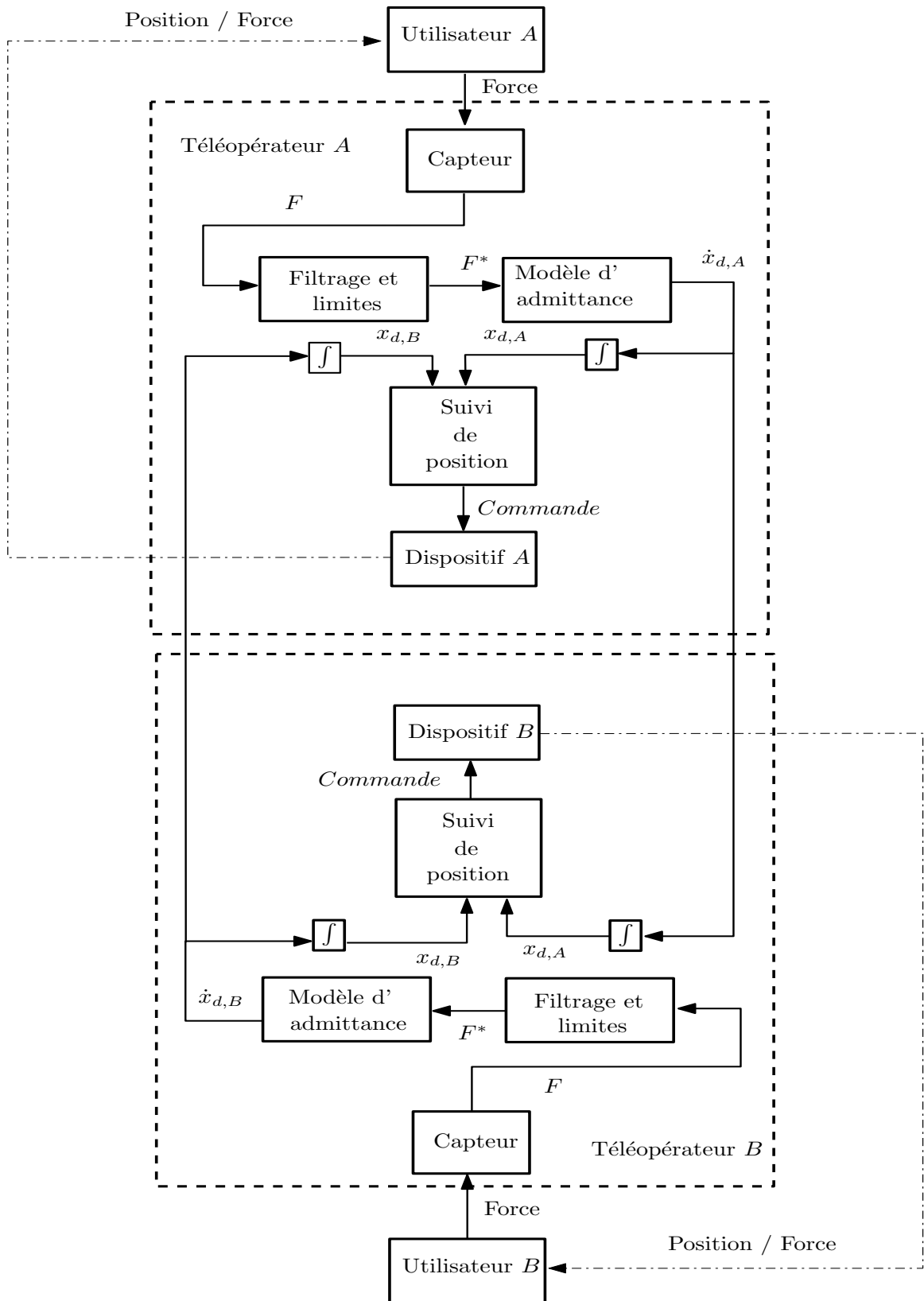


FIGURE 1.10 – Représentation schématique du système de télé-opération bilatéral contrôlé en admittance.

petit rapport de réduction. Dans le cas présent, le système est donc rétro-commandable. C'est en effet ce système qui a été utilisé afin d'étudier le contrôleur par impédance à la section 1.2, où aucun capteur n'était employé. L'utilisation du capteur de force est dès lors redondante, toutefois, elle nous permet de simuler le comportement qu'on cherche à reproduire pour n'importe quel système de télé-opération, peu importe l'interface haptique utilisée. Ce comportement peut être décrit comme suit : l'interface, ou le télé-opérateur, A se comporte comme l'utilisateur B de façon que son propre utilisateur — soit l'utilisateur A — ait l'impression d'interagir avec l'autre personne et non pas avec un robot. Pour ce faire, l'interface haptique a deux tâches principales : mesurer la force appliquée sur elle-même afin de la transmettre à l'autre côté du système et, en même temps, fournir à son utilisateur un retour du signal haptique correspondant à la force que le télé-opérateur de l'autre côté du système lui transmet. Ce « signal haptique » peut être aussi bien une poignée de main qu'un couple provoqué par une rotation autour de l'axe, tel que c'est le cas pour le bras de levier.

Nous présenterons par la suite comment la commande par admittance a été mise au point et validée en utilisant le bras de levier. Cette validation expérimentale nous permettra d'avoir une loi de commande fonctionnelle qui sera utilisée, avec seulement quelques modifications, jusqu'à la fin du projet.

1.3.4 Mise au point de la commande par admittance

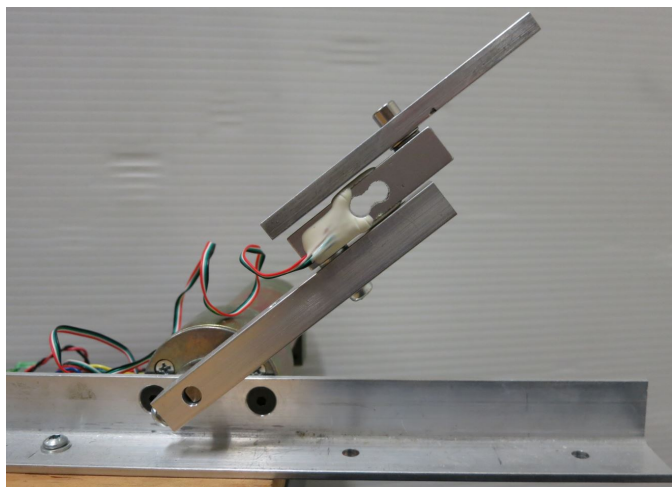


FIGURE 1.11 – Le mécanisme à un degré de liberté avec cellule de charge.

La loi de commande par admittance variable est maintenant validée expérimentalement. Pour ce faire, on emploie le mécanisme à un degré de liberté déjà présenté à la section 1.2, auquel on ajoute une cellule de charge (Fig. 1.11). Un test de suivi est

alors proposé pour comparer le système de télé-opération avec une commande par admittance au système de télé-opération avec une commande par impédance que l'on a présenté à la section 1.2. Pour ce dernier, nous avons défini la position désirée du levier A égale à la position réelle du levier B et vice-versa (eq. 1.14), où les positions réelles de A et B sont fournies par les encodeurs des moteurs. Nous avons utilisé le contrôleur par impédance pour effectuer le suivi de la position désirée. Maintenant l'approche est différente, car les positions désirées sont calculées à partir de la force mesurée par le capteur de force. En revanche, le suivi de la position désirée se fait de la même manière, c'est-à-dire en utilisant le même contrôleur par impédance présenté à la section 1.2. Ce n'est donc pas le suivi au sens strict que l'on veut étudier, mais plutôt la capacité du modèle d'admittance à transformer la force en position désirée. En d'autres termes, il faut travailler sur le réglage des coefficients virtuels m , c et sur le terme pour l'amortissement variable β afin d'obtenir un comportement égal ou du moins similaire entre les deux lois de commande. Les coefficients du modèle d'impédance sont les mêmes que nous avons définis auparavant.

Le test se déroule ainsi : un mécanisme est déplacé manuellement d'une position initiale de zéro degré à une position finale de 90 degrés tandis que le deuxième mécanisme suit le premier grâce au contrôleur en position simple d'abord et à l'aide du contrôleur par admittance plus contrôleur en position par la suite. Le test est répété trois fois et à chaque essai le mécanisme maître est déplacé à une vitesse à peu près le double de la précédente. Étant donné que le levier est bougé manuellement, il n'est pas possible de reproduire exactement le double de la vitesse précédente mais l'on parvient toutefois à obtenir une bonne approximation. La position du deuxième mécanisme est tracée avec celle du premier mécanisme pour les trois valeurs de fréquence choisies, c'est-à-dire $0,125Hz$, $0,25Hz$ et $0,5Hz$, correspondant aux trois essais, tel que nous pouvons l'observer sur la figure 1.12. Nous pouvons tout de suite remarquer que le réglage correct des coefficients m , c et β nous permet d'obtenir la même performance, que la position désirée soit calculée par le modèle d'admittance ou qu'elle soit fournie par l'encodeur des moteurs. Afin d'analyser ce résultat de façon plus rigoureuse, nous pouvons prendre en considération la différence de phase entre la trajectoire du mécanisme maître et celle de son esclave. Cette différence en degrés $\Psi(t)$ est calculée comme suit :

$$\Psi(t) = 360f\Delta t, \quad (1.34)$$

où f est la fréquence du déplacement et Δt le retard temporel, mesuré en trois points différents du graphe.

Les différences de phase sont indiquées pour chaque essai sur la figure 1.12. Il en résulte que le système de télé-opération avec une commande par admittance garantit des meilleures performances en matière de suivi de la position désirée. Le calcul de la position désirée à travers le modèle d'admittance permet au système d'être plus réactif, tandis que l'emploi de la valeur de l'encodeur implique un certain délai dans le système de télé-opération.

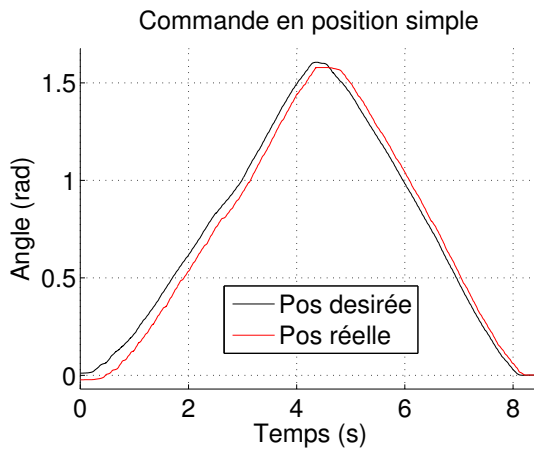
1.4 Conclusion

Ce premier chapitre introduit la loi de commande que nous allons utiliser pendant toute la thèse, c'est-à-dire la commande en force indirecte. Il s'agit d'un point fondamental du projet, tout aussi important que la réalisation de l'interface anthropomorphe elle-même, car seul un algorithme de commande viable peut permettre à l'interface de reproduire correctement les mouvements qui lui sont demandés et de bien transmettre la sensation haptique.

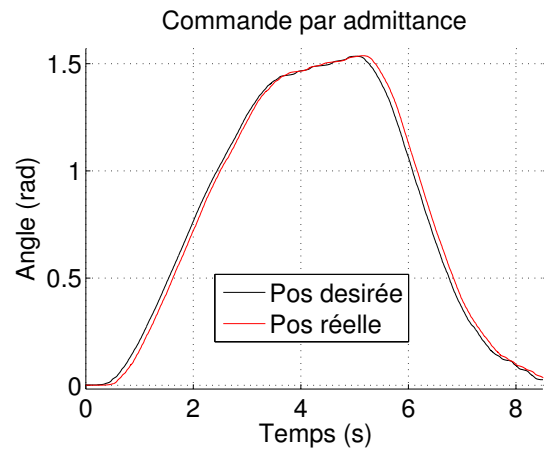
Nous avons, dans un premier temps, introduit la commande par impédance. Un système de télé-opération contrôlé en impédance a alors été développé et testé. La séance expérimentale fut plutôt brève, se limitant au réglage de certains coefficients de la loi de commande. Une application plus intéressante de ce même système sera présentée au chapitre 4.

Dans un second temps, la commande par admittance a été à son tour présentée et un système de télé-opération contrôlé en admittance fut développé et testé. Ce système a été validé expérimentalement en comparant ses performances à celles du système de télé-opération avec une commande par impédance. Les résultats furent très positifs.

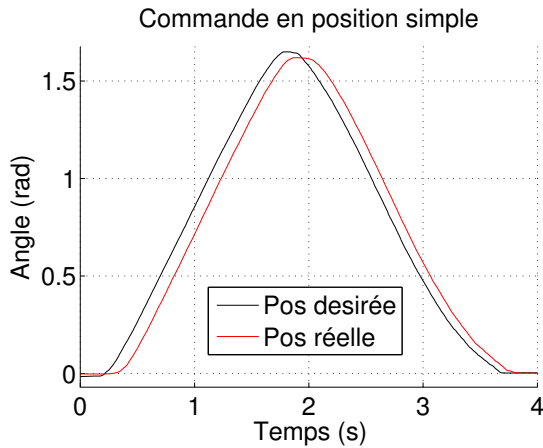
L'utilisation d'un mécanisme aussi simple que le bras de levier nous a permis de concentrer notre attention uniquement sur les contrôleurs employés. L'introduction des capteurs de force n'était pas nécessaire pour ce mécanisme, mais cela nous a permis de travailler sur certains paramètres de la commande afin que celle-ci fonctionne convenablement. En utilisant des interfaces haptiques plus complexes, l'emploi des capteurs de force devient nécessaire et la commande par admittance est le seul moyen de garantir une bonne interaction entre l'humain et le robot.



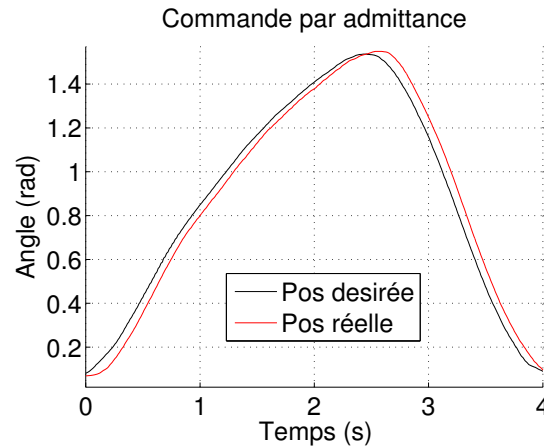
(a) Essai 1, $f \simeq 0,125Hz$, $\Psi = 7,2^\circ$



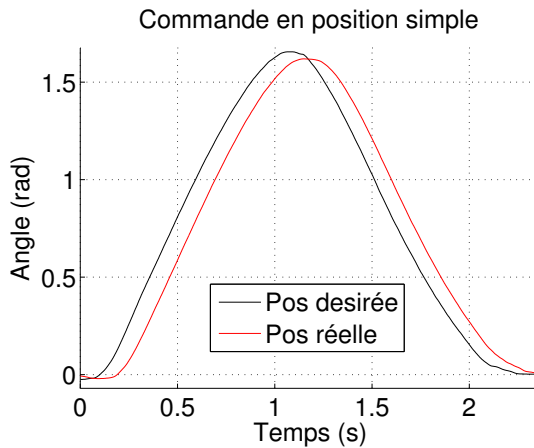
(b) Essai 1, $f \simeq 0,125Hz$, $\Psi = 3,6^\circ$



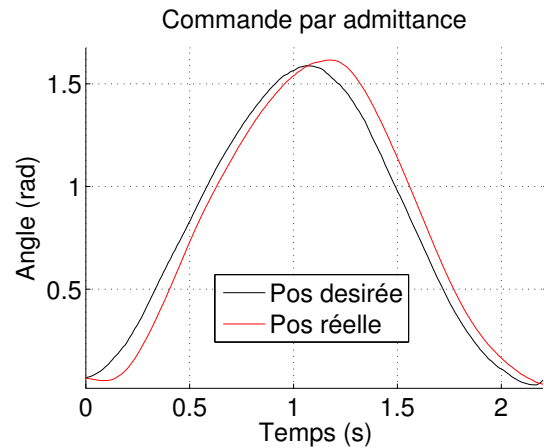
(c) Essai 2, $f \simeq 0,25Hz$, $\Psi = 10,2^\circ$



(d) Essai 2, $f \simeq 0,25Hz$, $\Psi = 6,68^\circ$



(e) Essai 3, $f \simeq 0,5Hz$, $\Psi = 18^\circ$



(f) Essai 3, $f \simeq 0,5Hz$, $\Psi = 12,8^\circ$

FIGURE 1.12 – Comparaison entre le suivi de trajectoire effectué avec la loi de commande en position simple, à gauche, et le suivi de trajectoire effectué avec la commande par admittance, à droite.

Chapitre 2

HARRI : l'interface haptique anthropomorphe pour une poignée de main robotique

Ce second chapitre présente une interface haptique capable de reproduire une poignée de main robotique intuitive et sécuritaire avec l'utilisateur humain. Les deux problèmes principaux liés à ce sujet sont illustrés et considérés au cours du chapitre : il s'agira tout d'abord de concevoir le dispositif en tenant compte de certaines conditions nécessaires au fonctionnement de celui-ci, tandis que, par la suite, notre attention se portera essentiellement sur l'ajustement de la commande permettant d'exécuter la tâche demandée.

Le but final de la thèse est de réaliser un système de télé-opération avec deux interfaces afin de mettre en communication deux personnes lointaines l'une de l'autre, en leur permettant de se serrer la main à distance. Toutefois, avant d'implémenter cette interaction humain-humain, l'interface elle-même doit être perfectionnée et validée, aussi bien du point de vue de la mécanique que de celui du contrôle. Pour ce faire, une interaction humain-robot sera étudiée dans ce chapitre.

2.1 Introduction à l'interaction humain-robot

L'interaction physique humain-robot — physical Human-Robot Interaction (pHRI) en anglais — commence à se définir comme domaine multidisciplinaire au milieu des années quatre-vingt-dix et au début du vingt-et-unième siècle. Nous pouvons cependant retrouver, dans une littérature encore antérieure à cette époque, de nombreuses recherches qui ont étudié l'interaction physique humain-robot. En général, la pHRI fait référence aux problèmes de compréhension et de gestion des interactions entre les robots et leurs utilisateurs humains. Une étude complète du problème a été présentée par [Goodrich and Schultz, 2007]. Dans le domaine de la pHRI, la technologie haptique concernant le sens du toucher joue un rôle très important. D'un point de vue physiologique, le sens du toucher peut être divisé en deux sous-systèmes : le sous-système cutané, ou tactile, et le sous-système kinesthésique. Une perception haptique est définie comme telle lorsque aussi bien le sous-système tactile que le sous-système kinesthésique sont impliqués [Loomis and Lederman, 1986], [Lederman and Klatzky, 2009].

L'interaction physique humain-robot proposée ici est une interaction de niveau supérieur, l'objectif étant celui de reproduire la forme la plus commune de salut entre les individus, c'est-à-dire la poignée de main. La littérature comporte peu de recherches sur la poignée de main entre un robot et une personne. En outre, les publications existantes à ce sujet se concentrent souvent sur le mouvement et le comportement du bras robotique. Dans [Yamato et al., 2008], un modèle de référence sur le secouement du bras est proposé et testé sur un système robotique pour le serrage des mains. Dans [Kasuga

and Hashimoto, 2005], des oscillateurs neuraux sont utilisés afin de contrôler la poignée de main. Dans [Wang et al., 2009], une méthode exploitant le modèle de Markov caché — Hidden Markov Model, HMM, en anglais — est proposée afin de gérer l’interaction physique humain-robot. D’autres recherches sur la poignée de main humain-robot ont été présentées dans les dernières années par [Kawarazaki et al., 2010], [Zeng et al., 2012], [Vanello et al., 2010], [Xie et al., 2011], [Jindai and Watanabe, 2011]. En ce qui concerne l’interaction humain-humain, d’autres travaux présentant une poignée de main entre deux utilisateurs existent, mais ceux-ci emploient des interfaces très élémentaires [Kunii and Hashimoto, 1995], [Hashimoto and Manoratkul, 1996], [Alhalabi and Horiguchi, 2001]. Nous voulons nous concentrer ici sur l’interface elle-même : afin d’avoir le meilleur ressenti haptique possible, cette interface doit être anthropomorphe. Elle doit dès lors ressembler à une main robotique à plusieurs doigts.

Lorsque l’on conçoit une main robotique à plusieurs doigts, nous considérons en premier lieu l’objectif à poursuivre et l’application finale du dispositif. À partir de cela, certains aspects doivent être pris en considération tels que l’anthropomorphisme, le nombre et la configuration des doigts, les moteurs et leur actionnement et l’utilisation des capteurs. Tel que mentionné auparavant, l’aspect anthropomorphe est fondamental dans cette application. Dans la littérature, cette caractéristique devient de plus en plus importante notamment en ce qui concerne le développement de mains prothétiques [Schulz et al., 2001], [Pons et al., 2004], [Zollo et al., 2007] ou la réalisation d’outils de recherche avancés pour des manipulations robotiques complexes [Kawasaki et al., 2002], [Butterfaß et al., 2001], [Lovchik and Diftler, 1999]. Un autre aspect intéressant du design concerne le nombre de moteurs à utiliser. En ce qui concerne les doigts, afin d’obtenir un dispositif simple et léger, nous prendrons en considération le principe du sous-actionnement, qui sera analysé au cours de ce chapitre.

Celui-ci est organisé comme suit : dans un premier temps le problème du design de l’interface sera illustré, en soulignant les conditions à respecter afin d’obtenir un mécanisme fort, raide et rapide. Dans un second temps, la loi de commande nécessaire pour garantir un comportement intuitif et réaliste de l’interface sera développée. Ensuite, nous présenterons une séance expérimentale où la nouvelle interface haptique sera testée par quelques personnes. En conclusion, nous étudierons et illustrerons en détail les résultats de cette séance de test.

2.2 Conception et réalisation de l'interface

L'objectif de ce travail est de concevoir et de construire une interface haptique capable de serrer la main de l'utilisateur. Afin d'avoir un comportement intuitif, cet appareil doit ressembler à une main humaine et agir comme tel. Dans cette section, le design de l'interface haptique est présenté, en montrant toutes les conditions dont on doit tenir compte pendant ce processus. La tâche « poignée de main » requiert deux caractéristiques principales : une paume réactive qui puisse être serrée et quelques doigts mécaniques pour que l'interface puisse serrer à son tour. Le processus de design peut dès lors être divisé en deux parties, l'une concernant la paume réactive, l'autre étudiant les doigts robotiques et leur actionnement.

La première étape de notre analyse est quant à elle dédiée au test préliminaire sur la force de serrage, dont l'objectif est d'établir les forces en jeu lors d'une poignée de main. Afin de déterminer quelles sont ces dernières, nous utilisons un dynamomètre manuel digital, le JAMAR Plus + (Fig. 2.1). Ce test nous donne des valeurs de force de serrage qui se révéleront très importantes pour la suite du travail. Le résultat final est une force de serrage maximale de $50N$ et une valeur moyenne de cette force de $25N$.



FIGURE 2.1 – Le dynamomètre digital JAMAR Plus+.

Davantage d'informations concernant ce test sont disponibles dans l'annexe A.

2.2.1 La paume réactive

Dans cette section, l'attention se porte sur le problème du design de la paume réactive de l'interface. Dans la littérature nous trouvons de nombreuses mains robotiques, toutefois, celles-ci sont caractérisées dans la plupart des cas par des paumes fixes. Parmi

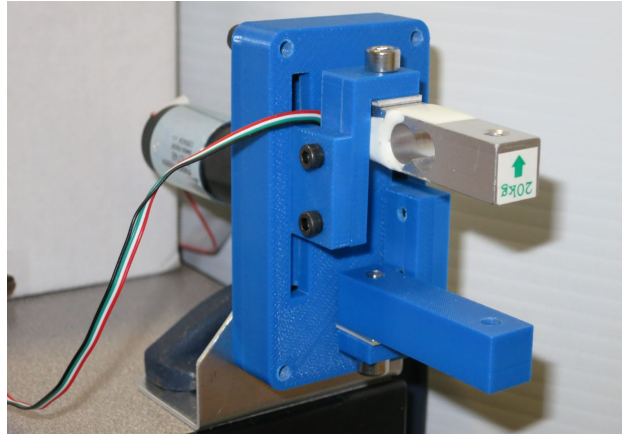


FIGURE 2.2 – Le mécanisme parallèle à pince à un degré de liberté.

les dispositifs les plus connus, nous pouvons mentionner les mains robotiques présentées par [Okada, 1979], [Jacobsen et al., 1986], [Melchiorri and Vassura, 1992] et [Butterfaß et al., 1998]. L'objectif de ces dispositifs étant très différent, il n'était pas nécessaire de les équiper d'une paume réactive. En revanche, dans le cas qui nous intéresse présentement, cette caractéristique s'avère fondamentale. La paume elle-même peut être définie comme un mécanisme à pince à un degré de liberté (fig. 2.2). Il s'agit d'un mécanisme à double crémaillère : la rotation du moteur guide le déplacement translationnel des deux barres parallèles en directions opposées (fig. 2.3). L'une de ces deux barres est équipée d'un capteur de force, que nous appellerons le CEP, c'est-à-dire le Capteur d'Effort de la Paume.

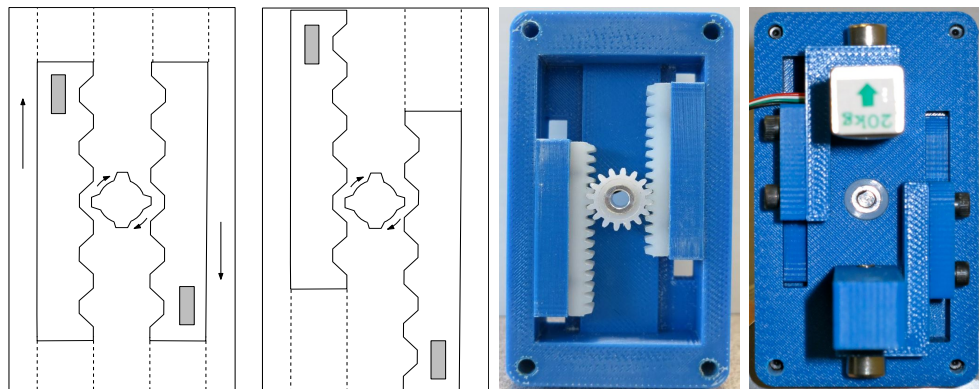


FIGURE 2.3 – À gauche, une illustration schématique du principe de fonctionnement de la double crémaillère. À droite, une vue interne et frontale du dispositif.

La paume doit en premier lieu être petite et compacte, l'espace disponible étant très limité et l'interface devant préférablement avoir la taille d'une main humaine. Elle doit en outre être capable d'exercer des forces suffisamment grandes au niveau des barres

TABLE 2.1 – Couples et vitesses maximales à la sortie du réducteur, pour le moteur Maxon avec les choix possibles de rapport de réduction.

Réducteur	Couple Disponible (Nm)	Vitesse Disponible (RPM)
84 :1	0,983	95
29 :1	0,406	276
5.4 :1	0,0906	1481,5

horizontales sans néanmoins limiter trop la vitesse des deux crémaillères. Pour cette raison le choix du pignon, et notamment de son diamètre, est crucial. Nous commençons dès lors à déterminer une force minimale requise et une vitesse minimale requise. Le premier paramètre est fourni par le test sur la force de serrage présenté au chapitre précédent. En ce qui concerne la paume, la condition de force minimale est plus importante que celle de vitesse. En effet, le déplacement global de la paume est assez limité et, de plus, une paume raide est désirable. La force minimale requise est en conséquence fixée à $50N$, c'est-à-dire la valeur maximale trouvée au cours du test de force de serrage. La vitesse minimale requise est déterminée de façon différente. On calcule tout d'abord la plus grande distance qui peut exister entre les deux barres : elle est égale à 53,5 millimètres. Cela implique une distance d'environ 25 mm à parcourir par chaque crémaillère. L'application de serrage de main étant prise en considération, une seconde semble être un temps raisonnable pour ouvrir ou fermer complètement la pince. À partir des valeurs de temps et de déplacement, nous pouvons aisément calculer une bonne estimation de la vitesse minimale requise, à savoir 25 mm/s. Il faut tout de même remarquer que, suite à l'ajout des doigts robotiques à l'interface, le déplacement global des crémaillères se réduit encore, impliquant une valeur effective plus petite que la vitesse minimale requise.

Nous avons défini crucial le choix du pignon dans le mécanisme à pince, mais cet adjectif s'applique également à d'autres éléments du design de la paume. Une autre décision tout autant importante concerne le rapport de réduction du moteur. Le tableau 2.1 illustre les performances que les réducteurs disponibles nous offrent. En ce qui regarde la paume, le moteur Maxon RE-max24 avec un rapport de réduction de 84 : 1 représente le meilleur choix, tel que cela sera démontré dans cette section.

Sur ces entrefaites, nous pouvons passer à l'analyse des conditions de vitesse et de force, en commençant par cette dernière. Le couple maximal disponible du moteur, dénommé $\tau_{m,max}$, est généralement estimé égal au double du couple continu du moteur $\tau_{m,c}$. Dans

ce cas-ci, nous considérons une approximation plus conservatrice en prenant $\tau_{m,max} = 1,7\tau_{m,c}$. Le couple maximal disponible à la sortie du réducteur, $\tau_{g,max}$, est calculé comme étant le produit du couple maximal du moteur, de la valeur d'efficacité du réducteur et de son rapport de réduction. La première colonne du tableau 2.1 représente le couple disponible pour tout réducteur. En parallèle, la vitesse maximale disponible à la sortie du réducteur s'obtient en calculant le rapport entre la vitesse d'entrée recommandée au réducteur, qui équivaut à 8000 RPM, et le rapport de réduction. Les vitesses pour tout réducteur sont illustrées dans la deuxième colonne du tableau 2.1. Nous pouvons dès lors calculer la plus grande force que le système peut produire comme suit :

$$F_{jaw} = \frac{\tau_{g,max}}{r_p}, \quad (2.1)$$

où r_p est le rayon du pignon. La force va être ensuite répartie entre les deux crémaillères, ce qui mène à $F_{rack} = \frac{F_{jaw}}{2}$.

Pour un rayon de valeur $r_p \simeq 6$ mm, on obtient une force sur chaque crémaillère d'environ 82 N, qui, théoriquement, suffira à achever la tâche. À titre d'exemple, si l'on avait utilisé le même pignon mais un réducteur de 29 : 1, on aurait obtenu $F_{rack} \simeq 34$ N, une force qui pourrait ne pas être satisfaisante. En effet, le tout premier mécanisme à pince a été construit en montant un moteur Maxon avec un réducteur de 29 : 1 et, malgré un ressenti appréciable, un certain manque de force et de raideur pouvait être constaté. En ce qui concerne la vitesse, le plus gros réducteur peut fournir un maximum de vitesse de 95 RPM, c'est-à-dire 9,95 rad/s. Pour un rayon $r_p \simeq 6$ mm, on est normalement capable d'atteindre une vitesse maximale d'environ 60 mm/s, ce qui est bien au-delà de ce dont on a besoin. Certes, des pertes de puissance sont également à prendre en considération, le rendement du système n'étant pas, de base, idéal. Cependant la marge dont nous disposons, aussi bien en force qu'en vitesse, est rassurante. Le mécanisme à pince constitue la première étape dans le processus de réalisation de l'interface haptique : dans le prototype final de main anthropomorphe, ce mécanisme joue le rôle de paume réactive et de structure portante, étant donné que les doigts mécaniques seront montés directement sur lui. Il est toutefois important de vérifier que le mécanisme à pince fonctionne correctement, et ce avant même d'achever le design de l'interface. Quelques tests ont donc été exécutés afin d'en étudier le rendement haptique. Ces tests ainsi que leurs analyses seront présentés au chapitre 3.

2.2.2 Les doigts sous-actionnés

Dans cette section, l'attention se portera sur les doigts robotiques qui viendront compléter l'interface en lui donnant l'aspect d'une main humaine. Avant de commencer l'analyse du processus de design, toutefois, il est important d'introduire le concept de sous-actionnement. Nous disons qu'un mécanisme est sous-actionné lorsqu'il a plus de degrés de liberté que d'actionneurs. Le sous-actionnement a été déjà employé, dans les dernières années, pour la conception de maints dispositifs, parmi lesquels quelques mains robotiques [Laliberté and Gosselin, 1998], [Massa et al., 2002], [Begoc et al., 2007], [Gosselin et al., 2008], [Laliberté et al., 2010], [Baril et al., 2012]. L'application de ce principe aux mains mécaniques a été étudié en détails par Birglen et al. [2008]. L'objectif principal du sous-actionnement est de simplifier le design et le contrôle du mécanisme. Lorsque l'on applique ce concept aux doigts mécaniques, on peut parler

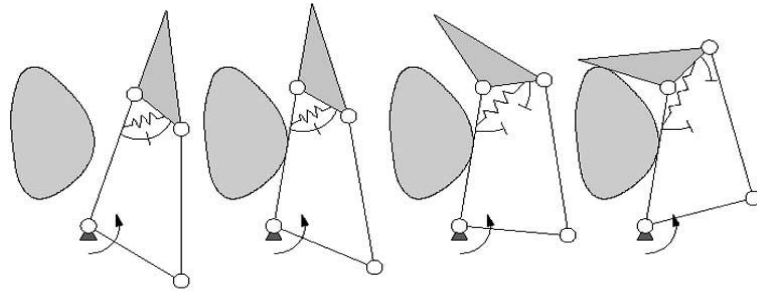


FIGURE 2.4 – Séquence de fermeture d'un doigt sous-actionné à deux degrés de liberté [Laliberté et al., 2002].

d'auto-adaptabilité [Laliberté and Gosselin, 1998], [Laliberté et al., 2002]. Un doigt auto-adaptable peut saisir à peu près n'importe quel objet et s'adapter à sa forme sans aucune stratégie complexe de contrôle, il suffit seulement d'un actionneur, tel que cela peut être observé sur la figure 2.4.

Les doigts que nous utilisons pour notre interface sont donc des doigts sous-actionnés, actionnés par un seul moteur. Le design de ces doigts s'inspire fortement de précédents travaux menés au laboratoire de robotique de l'Université Laval, notamment ceux de Gosselin et al. [2008], Laliberté et al. [2010], Baril et al. [2010], Baril et al. [2012].

Trois doigts sous-actionnés sont utilisés dans cette interface. Comme nous pouvons observer sur la figure 2.6, deux doigts, c'est-à-dire l'index et l'auriculaire, sont directement attachés aux deux barres qui composent la pince. Le troisième doigt, c'est-à-dire le majeur, est au contraire uni aux deux autres par des mécanismes à parallélogramme de

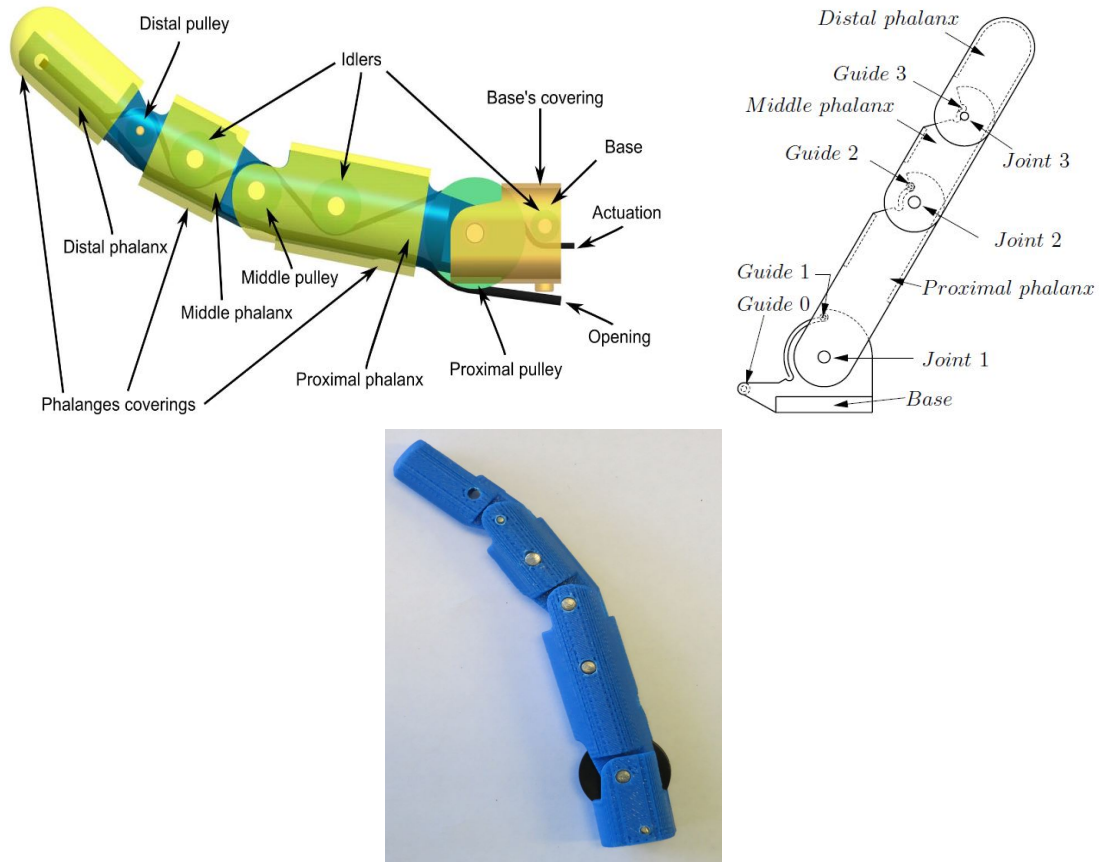


FIGURE 2.5 – En haut à gauche, le design géométrique du doigt sous-actionné proposé par [Gosselin et al., 2008]. En haut à droite, le modèle CAO du doigt présenté par [Baril et al., 2012]. En bas au centre, le prototype final de doigt pour la nouvelle interface.

façon à ce que, lorsque la paume se referme, celui-ci se déplace transversalement par rapport au plan de la pince, reste bien centré par rapport aux deux autres doigts et soit contraint en rotation. Ce mouvement du majeur vers l'extérieur, aussi bien que le mouvement de la paume qui se referme sur elle-même, simule bien le comportement de la main humaine. L'emploi de trois doigts au lieu de quatre a une raison bien précise qui n'est autre que la simplicité du design. L'interface avec trois doigts nous est tout de suite apparue comme étant la meilleure solution. L'espace disponible était en effet assez limité et n'aurait pas permis l'ajout éventuel d'un quatrième doigt. Nous supposons en outre que le rendu haptique ne soit pas appauvri de façon significative à cause de l'absence du doigt annulaire.

Tel que nous l'avons déjà mentionné, tous les doigts sont sous-actionnés et contrôlés par un seul moteur à travers un système de vis. Deux vis sont utilisées afin de stabiliser le mouvement translationnel des corps intermédiaires. La figure 2.7 illustre bien le

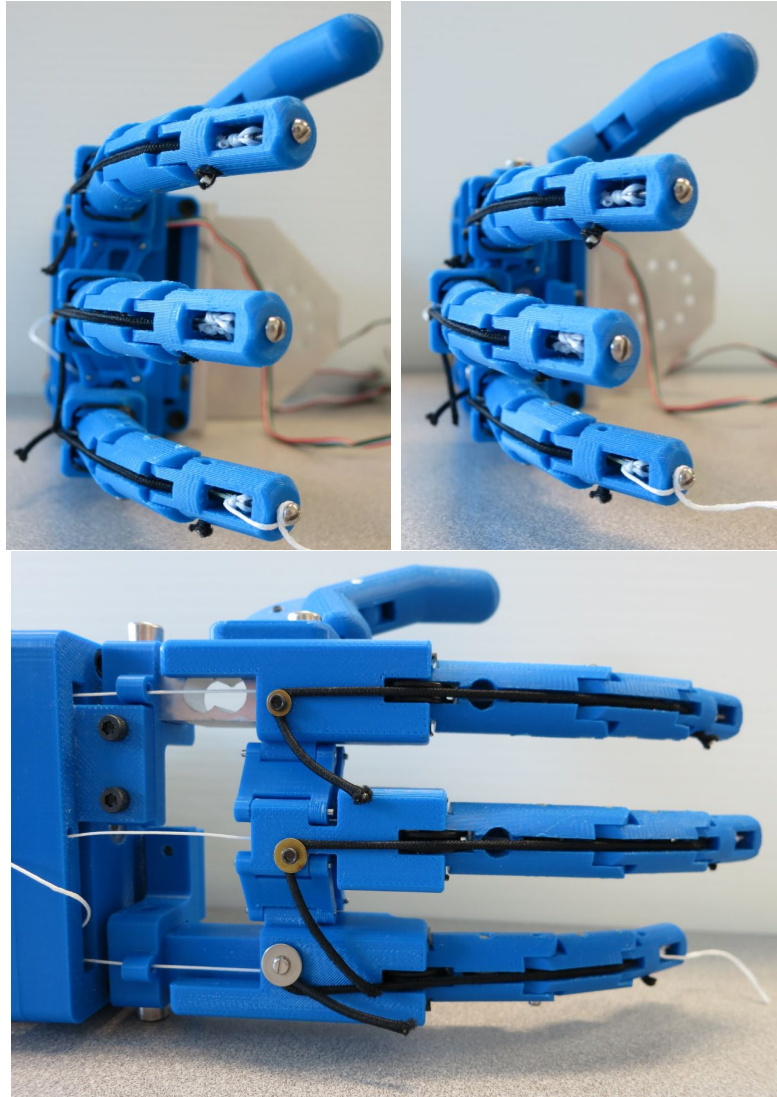


FIGURE 2.6 – Les configurations possibles pour les doigts sous-actionnés, en haut, et leur installation sur la paume, en bas.

système d'actionnement des doigts : la rotation du moteur active les deux vis, dont la rotation fait se déplacer le corps intermédiaire 1 et, en conséquence, le capteur de force et le corps intermédiaire 2, qui tire finalement les câbles des doigts. Le capteur de force, dénommé CED de Capteur d'Effort des Doigts, est utilisé pour mesurer la tension dans les câbles. La figure 2.8 représente en revanche la disposition des deux câbles qui tirent les doigts sous-actionnés : le premier câble est employé pour tirer soit l'index ou l'auriculaire et passe à travers le corps intermédiaire 2. Cette solution permet le sous-actionnement entre l'index et l'auriculaire et donc une adaptation globale à la géométrie et l'orientation de la main humaine — avec un doigt qui peut fermer plus

que l'autre. Finalement, le majeur est attaché au corps intermédiaire 2 à travers le deuxième câble.

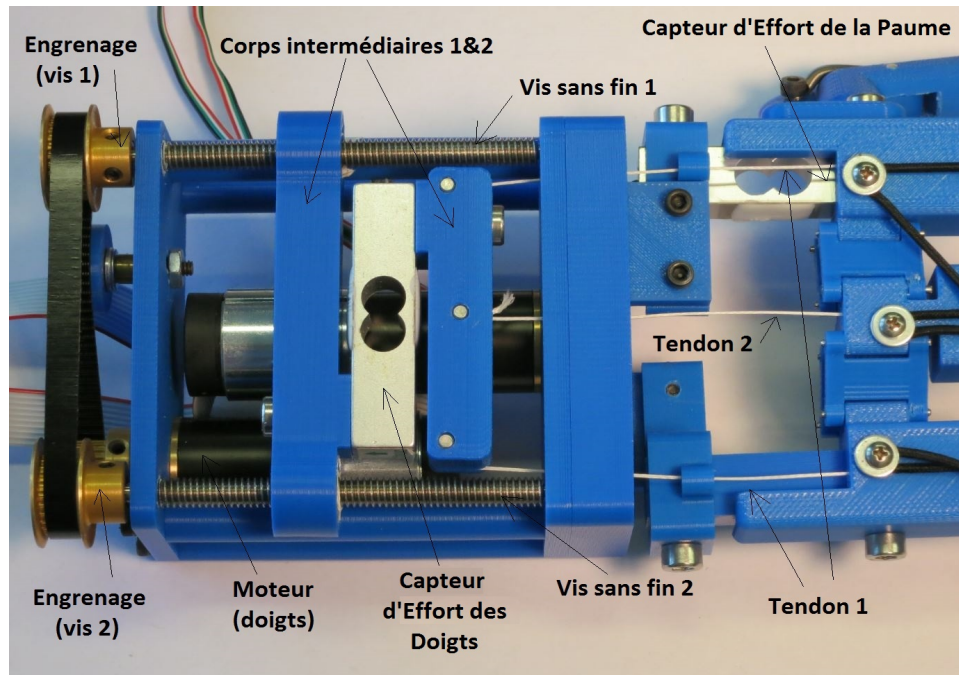


FIGURE 2.7 – Système d'actionnement des doigts.

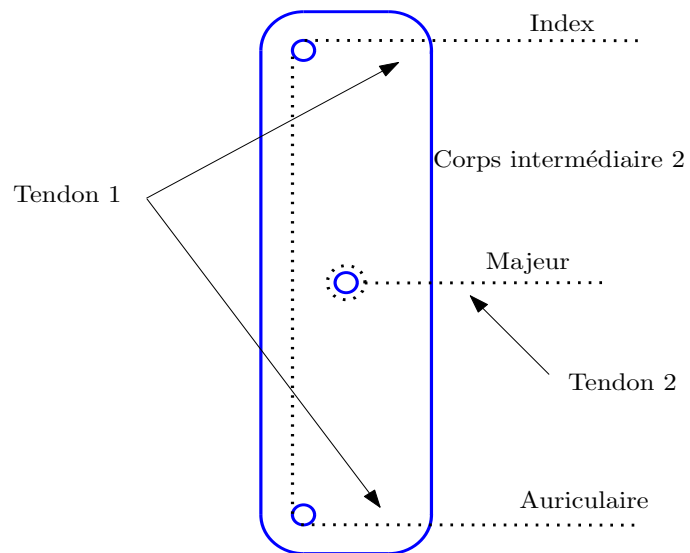


FIGURE 2.8 – Illustration schématique du principe de sous-actionnement adopté.

2.2.3 Conditions nécessaires pour le fonctionnement correct du système d'actionnement des doigts

Lors du design du système d'actionnement des doigts, quelques conditions nécessaires doivent être prises en considération. Elles sont principalement au nombre de deux : la première concerne la vitesse de déplacement, tandis que la seconde se concentre essentiellement sur la force que ce système peut exercer. Les doigts doivent pouvoir s'ouvrir et se refermer rapidement afin que l'interface ait un comportement intuitif et, en même temps, il faut que la force de serrage des doigts soit suffisamment grande afin que le rendement haptique soit appréciable. Ces deux conditions sont importantes et, malheureusement, liées entre elles : on ne peut en effet pas les choisir indépendamment et, une puissance d'activation étant donnée, un compromis s'avère nécessaire. Contrairement à ce que l'on avait pour la paume, où la condition de force était considérée comme étant la plus importante, pour les doigts la situation s'inverse : en effet, si d'un côté une main robotique qui referme rapidement ses doigts en exerçant une force limitée est acceptable, de l'autre une main capable de produire des grandes forces, mais très lente, n'est pas désirable. Une prise lente diminue fortement le rendu, tel que nous l'avons remarqué au cours de tests préliminaires.

La première étape consiste alors à estimer les valeurs nominales de vitesse et de force que le mécanisme doit être capable de reproduire. Considérons d'abord la vitesse, c'est-à-dire le temps total ΔT requis afin d'achever la fermeture complète des doigts et le déplacement total le long de la vis correspondant ΔX . ΔT_{max} est posé égal à 1 seconde, ce qui est le même temps défini pour le mouvement de la paume. En ce qui concerne ΔX , on peut dire que la fermeture d'un doigt s'achève quand toute poulie du doigt effectue une rotation de $\pi/2$ (fig. 2.9). Le déplacement est alors calculé comme suit :

$$\Delta X = (r_1 + r_2 + r_3) \frac{\pi}{2}, \quad (2.2)$$

où $r_1 \simeq 0,794cm$, $r_2 \simeq 0,397cm$ et $r_3 \simeq 0,119cm$, ce qui nous amène à $\Delta X \simeq 2cm$ et donc une vitesse estimée $V_{finger} \simeq 2cm/s$.

Considérons maintenant la condition de force. Le test sur la force de serrage, conduit avec le dynamomètre JAMAR, nous a fourni une valeur approximative mais indicative des forces en jeu lors d'une poignée de main. Tel que nous l'avons expliqué auparavant, la condition de force est moins importante que celle en vitesse pour l'actionnement des doigts, on peut alors prendre la valeur médiane du test comme valeur de référence, soit 25 N. Birglen and Gosselin [2004] présentent une méthode pour obtenir les capacités de force de n'importe quel doigt sous-actionné en décrivant la relation entre les couples à

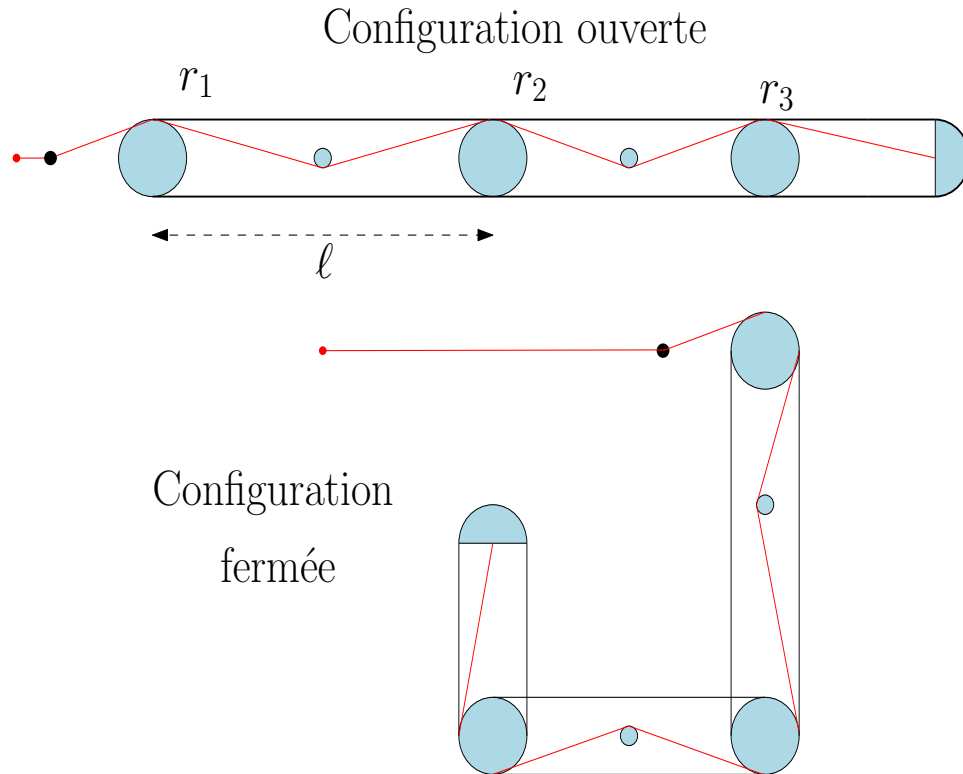


FIGURE 2.9 – Configurations possibles du doigt.

l'entrée de l'actionneur et les forces de contact sur les phalanges. Le problème de saisie d'objet étant ici secondaire, quelques simplifications peuvent être faites. On considère dès lors un seul point de contact, par exemple l'extrémité de la phalange proximale, et, pour une force de saisie connue, on calcule la tension des câbles T_F un utilisant l'équation suivante :

$$T_F = \frac{\ell}{r_1} F_{max}, \quad (2.3)$$

où $\ell \simeq 5,1cm$ est la longueur de la phalange et $F_{max} = 25N$, d'où $T_F \simeq 160N$. T_F est la tension estimée nécessaire dans les câbles afin que l'interface puisse exercer une force de 25 N à l'extrémité de ses doigts. Bien qu'il s'agisse d'une approximation plutôt grossière, cela nous donne une idée significative de la tension qui doit être générée dans les câbles afin d'avoir la force de serrage désirée.

Les composants à choisir avant de commencer le design de l'interface sont au nombre de deux, soit : le moteur, et notamment son réducteur, et la vis sans fin à utiliser dans le système de transmission des doigts. Un autre paramètre qui peut jouer un rôle décisif est R (fig. 2.11), c'est-à-dire le rapport de réduction entre l'engrenage du moteur et l'engrenage de la vis, qui influence directement les données finales de force de serrage

et de vitesse de fermeture disponibles. Si le rendement haptique n'est pas satisfaisant, ces engrenages pourront être changés sans nuire au fonctionnement du système.

Pour l'actionnement des doigts, nous prenons le moteur Maxon RE-max avec un réducteur de 5,4 : 1. Son petit rapport de réduction devrait permettre des mouvements très rapides, cependant le couple disponible pourrait ne pas être complètement suffisant. Bien évidemment un réducteur plus élevé peut également être choisi parmi ceux disponibles (tableau 2.1). La condition en vitesse étant la condition principale pour le système d'actionnement des doigts, le réducteur le plus petit donne les meilleures garanties. Tout cela sera analysé dans la suite de cette section.

Nous portons donc notre attention sur la vis sans fin. Le choix dépend toujours des conditions de force et de vitesse. Il faut que l'interface soit capable d'exercer des forces assez grandes tout en pouvant s'ouvrir et se refermer à la vitesse désirée. Le tableau 2.2 contient les données de quelques vis que nous avons étudiées pour le système de transmission des doigts. Les valeurs de couple et de vitesse ne tiennent pas compte des effets de friction du système. La vis numéro I et la vis numéro II sont plutôt similaires. La seule différence étant le pas de vis, la vis II demande en général un peu moins de vitesse et un peu plus de couple que la vis I pour accomplir les conditions de vitesse et de force. En revanche, la vis numéro III est une vis très différente, qui demande beaucoup moins de vitesse à l'entrée mais également un couple plus grand. De plus, ses dimensions risquent d'être trop élevées pour la taille de l'interface, raison pour laquelle elle est immédiatement écartée. En effet, si un échange entre la vis I et la vis II serait envisageable, dans le cas où le dispositif serait trop lent, l'emploi de la vis III requerrait une modification significative du design. Étant donné que nous menons notre analyse en utilisant un moteur avec un petit réducteur, ce qui est déjà très limitatif pour la force, nous décidons de privilégier cette fois-ci la condition la plus faible en optant en premier lieu pour la vis I.

Commençons en analysant la vitesse de rotation de la vis, qui peut être calculée comme suit :

$$V_{RPM} = \frac{60V_l}{L} \quad (2.4)$$

où V_l est la vitesse linéaire et L le pas de vis. Pour $V_l = V_{finger} = 2 \text{ cm/s}$ et en choisissant la vis numéro I du tableau 2.2, nous savons que le moteur Maxon RE-max avec 5,4 : 1 de réducteur devrait pouvoir fournir une vitesse d'entrée suffisante pour $R = 0,5, 1$ et $1,4$, tandis que pour $R = 2$ le système risquerait d'être trop lent.

Passons maintenant à l'analyse de la condition de force, qui est une opération un peu

TABLE 2.2 – Couple et vitesse demandés en entrée de la vis pour satisfaire respectivement les conditions de force et de vitesse.

	R	Couple demandé (Nm)	Vitesse demandée (RPM)
Vis I ($L = 0,127cm$) ($d_m = 0,635cm$)	0,5	0,272	480
	1	0,136	960
	1,4	0,097	1344
	2	0,068	1920
Vis II ($L = 0,15875cm$) ($d_m = 0,635cm$)	0,5	0,288	384
	1	0,144	768
	1,4	0,103	1075
	2	0,072	1536
Vis III ($L = 0,3175cm$) ($d_m = 0,9525cm$)	0,5	0,4768	192
	1	0,2384	384
	1,4	0,1703	537,6
	2	0,1192	768

plus complexe à cause des termes de friction en jeu, illustrés sur la figure 2.10. Pour une vis sans fin, nous pouvons calculer le couple lié à une charge F_L en utilisant l'équation suivante [Jones et al., 2004] :

$$\tau_{LS} = \frac{F_L d_m}{2} \left(\frac{L + \pi \mu d_m}{\pi d_m - \mu L} \right) + \tau_{f,c} \quad (2.5)$$

où τ_{LS} est le couple à l'entrée de la vis, d_m son diamètre moyen et μ le coefficient de friction. $\tau_{f,c}$ est le terme de friction au collier de vis, c'est-à-dire la friction entre la vis et le collier sur lequel elle s'appuie. Ce terme se calcule comme suit :

$$\tau_{f,c} = \frac{F_L \mu d_c}{2} \quad (2.6)$$

où d_c est le diamètre moyen du collier, ce qui représente la surface de contact. Ce dernier terme peut être réduit en utilisant un petit expédient : la vis est montée de façon à ce que seulement son extrémité, donc une surface moins étendue, soit en contact avec la structure de la paume. Cela diminue considérablement le terme $\tau_{f,c}$ et en conséquence le terme τ_{LS} est également plus petit, ce qui signifie qu'en entrée nous avons besoin d'un couple plus petit afin d'obtenir la même force de serrage finale.

Un deuxième expédient est proposé afin de réduire encore plus τ_{LS} . Une fine couche de polytétrafluoroéthylène (PTFE) est placée sur la surface de contact entre la vis et la structure de la paume et un écrou de PTFE est inséré entre la vis et le corps intermédiaire 1. En ce faisant, on réduit le coefficient de friction μ . Pour un contact

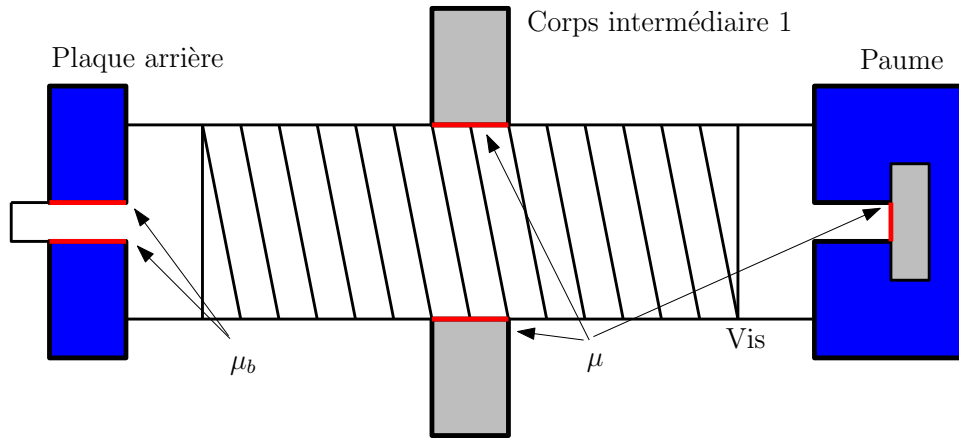


FIGURE 2.10 – Les coefficients de friction dans le système de transmission.

entre un composant en PTFE et un autre en acier, μ vaut normalement entre 0,1 et 0,2, ce qui est mieux qu'un contact entre deux composants en acier, dont le coefficient de friction peut valoir entre 0,5 et 0,8.

Malheureusement, d'autres sources de friction et de pertes de puissance existent dans l'interface, dont la plus importante est celle causée par le système de transmission entre le moteur et les vis, illustré sur la figure 2.11. À cause des effets naturels de friction, le rendement de ce système, e , n'est pas de 100% et il faut alors le calculer, ou du moins l'estimer. Une bonne approximation peut être exprimée comme suit :

$$e = \frac{\tau}{\tau + \tau_{f,b}} \quad (2.7)$$

où $\tau_{f,b}$ est le couple perdu à cause de la friction aux paliers. Afin de calculer $\tau_{f,b}$ quelques hypothèses sont nécessaires. Premièrement, on suppose que la courroie est étirée correctement, ce qui se fait en plaçant bien la poulie de réglage, de façon à ce que la pré-tension $T_{B,0}$ soit équivalente à la force maximale transmise, soit $\tau_{m,max}/r_m$, où $\tau_{m,max}$ est le couple maximal fourni par le moteur. La seconde hypothèse concerne la tension de la courroie : celle-ci change le long de la courroie, mais on la considère cependant uniforme, soit $T_{B,mean}$ où $T_{B,mean} = T_{B,0}$. Une troisième hypothèse est enfin nécessaire pour le calcul des forces latérales $F_{lat,i}$, où $i = 1, 2$: les deux côtés de la courroie entourant chaque engrenage sont considérés parallèles l'un à l'autre. Cette hypothèse nous mène à $F_{lat,i} = 2T_{B,mean}$. Pour les deux paliers, on peut dès lors calculer le couple perdu à cause de la friction en utilisant l'équation suivante :

$$\tau_{f,b} = 2F_{lat,i}\mu_b r_B \quad (2.8)$$

où r_B est le rayon du palier et μ_b le coefficient de friction entre la vis et la plaque en arrière, laquelle est en plastique. Le contact étant entre un composant en plastique et un en métal, nous savons que la valeur de μ_b est plus grande que μ .

Suite à toutes les hypothèses qui ont été faites, nous sommes dans l'incapacité de définir précisément la valeur de μ_b et par conséquent de déterminer exactement le rendement e . Il est néanmoins possible d'estimer une plage de valeur de ce coefficient, laquelle se trouve être $e \in [0,7, 0,8]$.

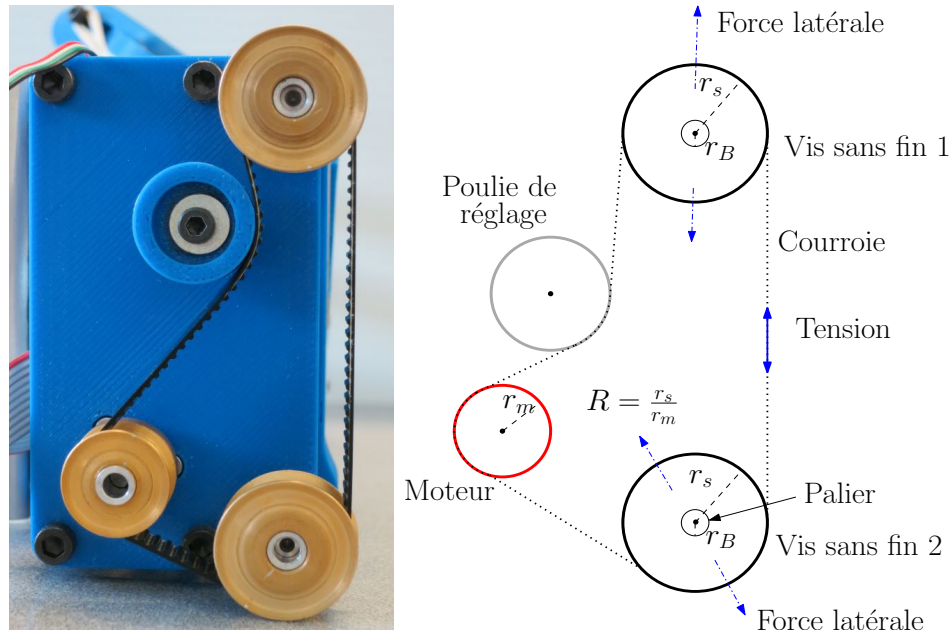


FIGURE 2.11 – Le système de transmission à l'arrière de l'interface et sa schématisation. La poulie pour le réglage de tension peut être déplacée horizontalement afin de bien tendre la courroie.

Tel que nous l'avons dit auparavant, il ne faut pas que le rapport de réduction R entre l'engrenage du moteur et les engrenages des vis dépasse $R = 1,4$. Une valeur plus élevée garantirait de plus grandes forces mais l'interface ne serait pas assez rapide, du moins ne le serait-elle pas en utilisant la vis I. Pour aller chercher le plus de force possible, toujours en restant dans des conditions acceptables de vitesse, on prend $R = 1,4$. La tension dans les câbles nécessaire à obtenir une force de serrage satisfaisante a été estimée à $T_F = 160N$. À partir de cette valeur-ci le couple requis à l'entrée de la vis peut être calculé en posant $F_L = T_F$. On essaie maintenant de calculer la force de serrage de l'interface, bien qu'on ne puisse le faire que de manière approximative, à cause des nombreuses incertitudes liées aux effets de friction et au rendement du système de transmission. Nous allons dès lors procéder différemment, en estimant plutôt une

plage de valeurs de cette force. Pour ce faire, nous utilisons dans un premier temps les prévisions les plus optimistes pour les valeurs incertaines, tandis que dans un second temps on donne à ces mêmes variables la valeur la plus pessimiste. Lorsque l'on parle de valeurs incertaines, nous faisons référence aux coefficients de friction μ et μ_b et en conséquence au rendement e . Nous pourrions éventuellement faire varier la valeur de d_c , c'est-à-dire la surface de contact entre la vis et la structure portante, bien que l'incertitude liée à cette valeur ne soit pas autant significative que celles des termes de friction. En résumé, en variant les coefficients μ et μ_b , nous pouvons déterminer le pourcentage de couple requis à l'entrée de la vis que le moteur peut fournir dans cette configuration. En ce qui concerne la projection optimiste de la force de serrage finale, nous considérons une valeur de $\mu = 0,1$ et de $\mu_b \simeq 0,3$, ce qui donne un rendement d'environ 0,8. Nous obtenons, avec ces valeurs, un système transmettant aux doigts 106% du couple requis pour une force de serrage de 25 Newton. En d'autres mots, l'interface haptique devrait pouvoir atteindre une force de serrage de plus de 26 N. En revanche, une projection pessimiste donne des résultats beaucoup moins encourageants. Pour celle-ci, nous prenons $\mu = 0,2$ et $\mu_b \simeq 0,5$, qui correspond à un rendement d'environ 0,69. Avec ces nouvelles valeurs, on obtient seulement 54,8% de couple requis pour une force de serrage de 25 N, c'est-à-dire que l'interface peut serrer avec une force atteignant moins de 14 N. Tout cela sans prendre en compte que la surface de contact entre la vis et la paume puisse être plus grande.

La plage des valeurs possibles de force est très étendue et est, à priori, difficile à réduire. La section 2.4.1 présente quelques tests préliminaires dont l'objectif est de déterminer la force réelle de serrage de l'interface.

2.2.4 Le pouce

L'objectif principal du pouce est de donner à l'utilisateur un point de référence sur l'interface, afin qu'il sache comment le saisir, mais également à stabiliser la poignée de main. Le pouce anthropomorphe, illustré sur la figure 2.12, est guidé passivement par la main de l'utilisateur. En outre, il est auto-adaptable. Lors d'une poignée de main, l'utilisateur peut appuyer sa main contre le pouce anthropomorphe, lequel résistera à la force provoquée par la fermeture des doigts sous-actionnés. Dans ce sens-là, nous disons que le pouce stabilise la poignée de main. Dans une première version, ce pouce n'était pas anthropomorphe. Il était constitué d'une simple pièce cylindrique en plastique et ne pouvait pas accomplir cette tâche de stabilisation.

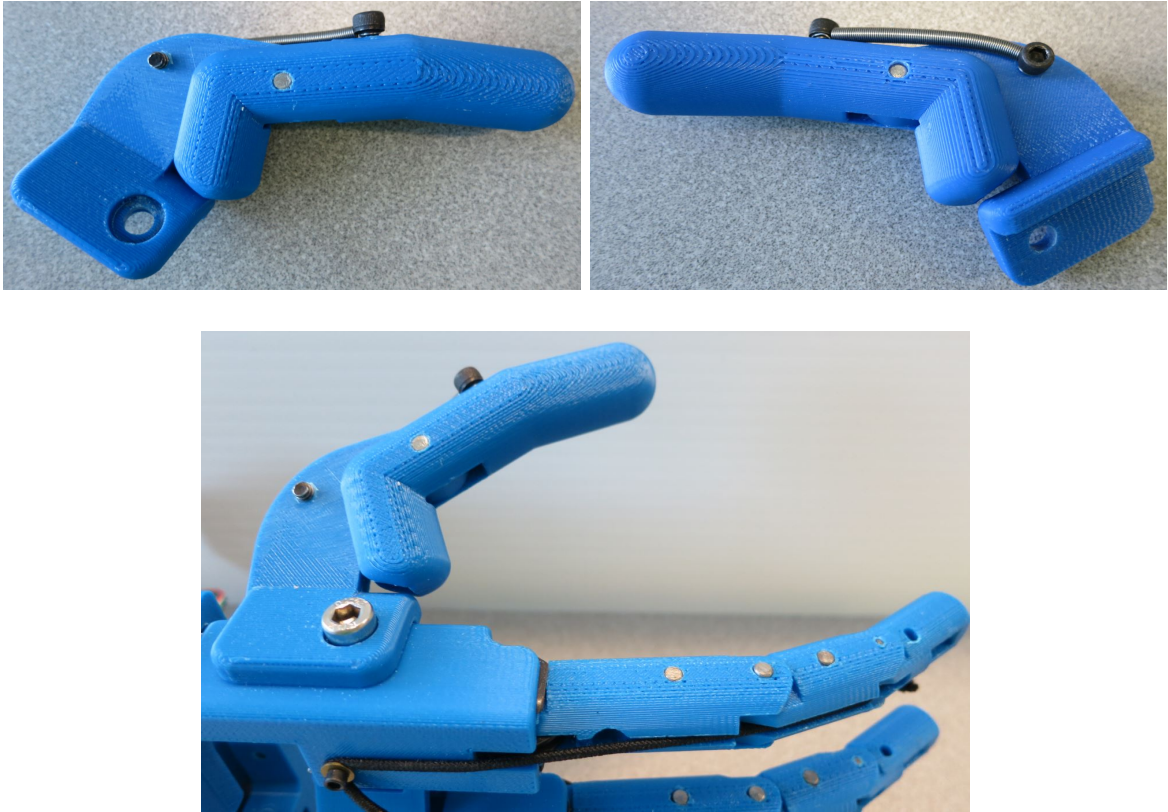


FIGURE 2.12 – Le pouce.

2.2.5 Le prototype final

Nous pouvons enfin présenter l'interface haptique pour la poignée de main robotique, telle qu'illustrée à la figure 2.13. Nous avons appelé cette interface Handshaking Anthropomorphic Reactive Robotic Interface, ou plus simplement « HARRI ». HARRI est en premier lieu une *interface robotique*. Mais cette interface est également *anthropomorphe*. En effet, afin de la concevoir nous nous sommes directement inspirés de la main humaine de laquelle elle se rapproche aussi bien par sa taille que par sa forme. Enfin, elle est aussi *reactive*, car elle réagit aux stimulations externes grâce à deux capteurs de force, qui lui permettent d'interagir avec l'utilisateur. En bref, elle est *handshaking* parce qu'elle peut serrer la main d'une personne en lui donnant la sensation d'une vraie poignée de main. À quelques exceptions près, HARRI est entièrement constitué de pièces en Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS). Toutes ces pièces sont imprimées avec la machine de prototypage rapide. Un prototype en ABS est moins résistant qu'un prototype en métal mais, d'un point de vue expérimental, il représente un avantage puisqu'il garantit une interaction humain-robot plus sécuritaire : les prototypes en ABS se brisent avant de blesser l'utilisateur.

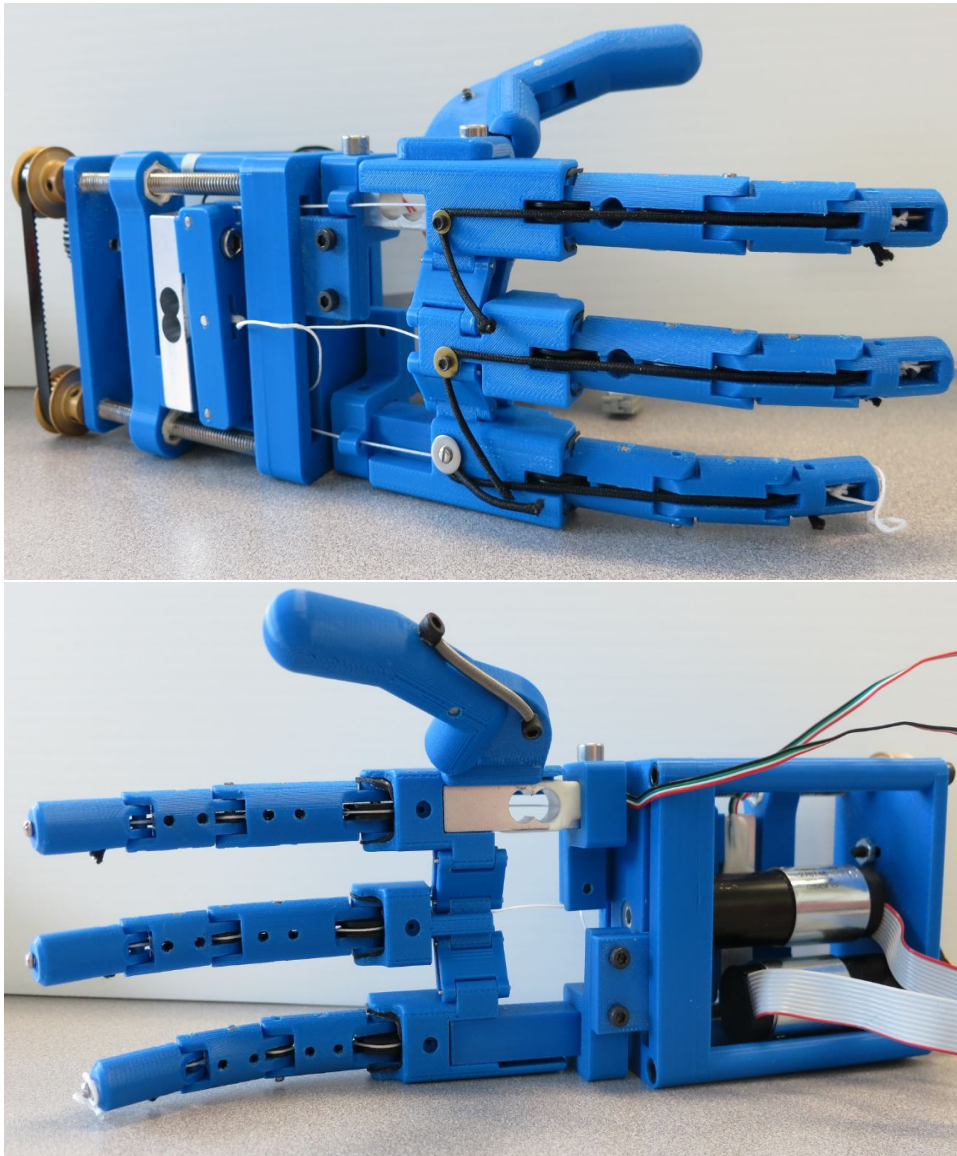


FIGURE 2.13 – Le prototype final de HARRI.

2.3 Commande

L'objectif de l'algorithme de commande est de rendre HARRI capable d'accomplir efficacement la tâche demandée, c'est-à-dire de serrer la main de l'utilisateur de façon intuitive et réaliste. En raison des pertes significatives de puissance dans le système de transmission et du réducteur du moteur employé, lequel possède un rapport de réduction très grand, le mécanisme n'est pas rétrocommandable. Deux cellules de charge sont alors employées afin de déduire les intentions humaines et permettre à l'interface d'interagir en sécurité avec l'utilisateur. Le capteur d'effort de la paume, dénommé

CEP, joue le rôle principal dans cette interaction humain-robot : aussi bien la paume elle-même que les doigts sont actionnés en fonction de la force que cette cellule de charge mesure. Le capteur d’effort des doigts — le CED — est utilisé en revanche afin d’améliorer l’interaction et de la rendre sécuritaire, tel que nous l’expliquerons plus en détail dans la section 2.3.4. L’algorithme de commande est représenté schématiquement à la figure 2.14 et décrit en détail dans les sections qui suivent.

L’interface haptique est commandée essentiellement à travers deux systèmes à double contrôleur, un contrôleur par admittance variable pour la transformation du signal de force en position désirée et un contrôleur en position pour le suivi de ce signal. Les deux systèmes sont utilisés respectivement l’un pour le contrôle de la paume et l’autre pour les doigts. Nous allons analyser par la suite comment ces contrôleurs ont été adaptés au cas spécifique de HARRI et quelles modifications ont été nécessaires afin d’obtenir le meilleur comportement possible.

2.3.1 Le contrôleur par admittance variable

Considérons en premier lieu le contrôleur par admittance, qui transforme le signal de force sortant de la cellule de charge en un signal de vitesse ou de position, selon l’application. Nous avons dit dans le premier chapitre qu’une commande en vitesse ne garantit pas un comportement suffisamment raide du dispositif et que dès lors un contrôle en position s’avère plus adapté. L’interface haptique pour la poignée de main robotique doit réagir aux forces externes et retourner à sa position initiale dès que ces forces disparaissent. Par conséquent, nous prenons le modèle dynamique décrit à l’équation (1.25) comme modèle de référence et nous calculons la position désirée en utilisant les équations (1.27) et (1.28). Il faut également que cette position soit limitée :

$$x_{d,P} \in [0, X_{max,P}] \quad (2.9)$$

$$x_{d,F} \in [0, X_{max,F}] \quad (2.10)$$

où $X_{max,P}$ et $X_{max,F}$ sont respectivement les valeurs de position auxquelles la paume et les doigts sont complètement fermés. Cette limitation est imposée afin d’éviter que les servomoteurs appliquent un couple lorsque la limite mécanique a été atteinte, ce qui pourrait bloquer et endommager le dispositif. Certaines limites de vitesse doivent également être fixées afin de rendre le comportement de l’interface plus intuitif. À titre d’exemple, il n’est pas désirable que la paume et les doigts se referment à la même vitesse, leur comportement désiré étant différent.

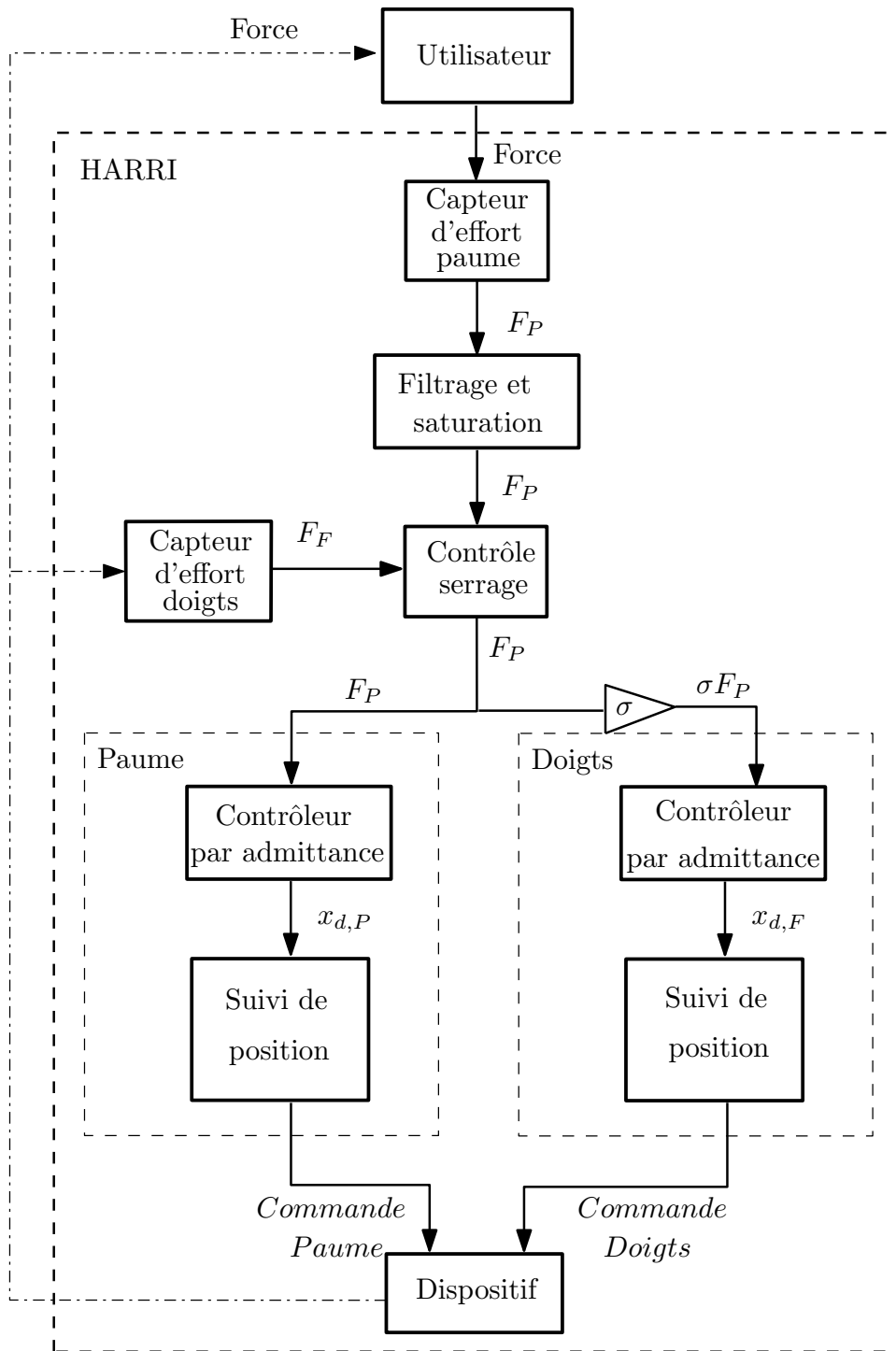


FIGURE 2.14 – Représentation schématique de l'algorithme de commande.

Il a été mentionné auparavant que les performances de l'interface peuvent être significativement améliorées en utilisant une commande par admittance variable, c'est-à-dire en variant certains paramètres en fonction de la force mesurée par le CEP. Les déplacements

ments étant toujours assez limités, une variation de la masse n'a pas d'effet significatif sur la réponse du système. En revanche, un amortissement et une raideur variables affectent significativement le comportement de ce système. Bien que nous définissions une seule équation pour la variation de tous les paramètres (amortissement et raideur), c'est-à-dire l'équation (1.32) avec (1.33), chaque terme sera modifié individuellement, afin d'obtenir la meilleure réponse possible, tel que cela sera montré dans la suite du chapitre.

Amortissement variable dans le modèle d'admittance de la paume

La valeur du coefficient d'amortissement dans le modèle d'admittance de la paume est déterminée par les équations 1.32 et 1.33, c'est-à-dire les équations qui définissent le coefficient d'amortissement pour le mécanisme à un degré de liberté. Nous avons alors :

$$c_P(t) = c_{max,P} - \alpha_P | f_H(t) | \quad (2.11)$$

avec

$$\alpha_P = \frac{c_{max,P} - c_{min,P}}{f_{H,max}}. \quad (2.12)$$

Les valeurs de c_{max} et de c_{min} utilisées ici sont toutefois différentes de celles définies pour le mécanisme à un degré de liberté. Nous appelons dès lors $c_{max,P}$ et $c_{min,P}$ les amortissements virtuels, maximal et minimal, de la paume. La valeur de $f_{H,max}$ est aussi très importante. Si une force de saturation trop grande était choisie, la valeur d'amortissement ne descendrait jamais assez pour permettre un bon fonctionnement du système, tout comme une saturation trop rapide rendrait peu utile l'emploi d'un terme d'amortissement variable. Pour ce système, nous définissons dans un premier temps $f_{H,max} = 25N$, c'est-à-dire la valeur médiane trouvée lors du test de force de serrage. Cette valeur sera légèrement modifiée au cours des tests préliminaires.

Amortissement variable dans le modèle d'admittance des doigts

Considérons maintenant le terme d'amortissement dans le modèle d'admittance des doigts. L'approche, bien que similaire, diffère légèrement. En effet, nous cherchons toujours à avoir une petite valeur d'amortissement lors d'une interaction avec l'utilisateur, afin de permettre aux doigts de se déplacer rapidement, et une valeur plus élevée lorsque la force externe disparaît, afin que le dispositif puisse s'arrêter à temps. Il existe cependant une différence importante entre le mouvement de la paume et celui des doigts, ce dernier devant en effet être beaucoup plus rapide. Bien que le déplacement linéaire global des corps intermédiaires soit limité, la rotation globale du moteur actionnant les

doigts est très grande. Par conséquent, afin que le moteur puisse achever le mouvement à temps, il nous faut un amortissement virtuel c_F presque nul lors de la rotation du moteur, et ce afin de lui faciliter la tâche. En revanche, il faut également que ce coefficient retrouve sa valeur maximale dès que la force externe disparaît. Nous pouvons dès lors exprimer le coefficient d'amortissement c_F comme suit :

$$c_F(t) = c_{max,F} - \alpha_F | f_H^*(t) | \quad (2.13)$$

où

$$\alpha_F = \frac{c_{max,F} - c_{min,F}}{f_{H,max}^*} \quad (2.14)$$

$c_{max,F}$ et $c_{min,F}$ représentent respectivement la valeur d'amortissement maximale et minimale tandis que la limite de force est ainsi définie :

$$f_{H,max}^* = \frac{f_{H,max}}{10}. \quad (2.15)$$

Cet expédient nous permet d'avoir un coefficient d'amortissement c beaucoup plus sensible aux variations de la force externe. Afin d'avoir $c_F \in [c_{min,F}, c_{max,F}]$, en revanche, il faut employer une variable de force f_H^* équivalente à f_H mais dont la valeur est saturée à $\frac{f_{H,max}}{10}$. En résumé, c_F varie dix fois plus rapidement que c_P et il atteint sa valeur minimale pour un dixième de la force mesurable, c'est-à-dire environ 2,5 N. De cette façon, les doigts ont un amortissement très bas pour des valeurs limitées de force, ce qui est indispensable afin d'obtenir une fermeture complète plus rapide.

Raideurs variables dans les deux modèles d'admittance

Nous pouvons finalement analyser les coefficients de raideur virtuelle k_C et k_P . En ce qui concerne la raideur virtuelle, il faut que ce coefficient soit variable afin d'exécuter correctement la tâche. Une valeur élevée est nécessaire afin de ramener le moteur à sa position initiale mais, en revanche, lors d'une poignée de main une valeur presque nulle de raideur est requise afin de ne pas empêcher le mouvement. Il en résulte que le comportement désiré est le même comportement que celui défini pour le coefficient d'amortissement dans le modèle des doigts, c'est-à-dire une variable très sensible aux changements de la force externe. Cela nous mène à l'équation suivante pour les raideurs réelles :

$$k(t) = k_{max} - \beta | f_H^*(t) | \quad (2.16)$$

où

$$\beta = \frac{k_{max} - k_{min}}{f_{H,max}^*} \quad (2.17)$$

$f_{H,max}^*$ est la valeur constante définie à l'équation 2.15 et k_{min} et k_{max} représentent respectivement la raideur virtuelle minimale et maximale du système dynamique. La variable f_H^* est encore utilisée afin d'avoir $k \in [k_{min}, k_{max}]$. Il est important de remarquer que les coefficients k_P et k_F partagent la même équation mais qu'ils n'ont pas les mêmes valeurs limites.

La raideur variable étant définie de cette façon, le comportement résultant ne serait pas encore celui désirable. Contrairement au terme c_F , qui doit retrouver sa valeur maximale le plus rapidement possible afin de freiner le moteur à l'instant où l'utilisateur lâche prise, il faut que les raideurs virtuelles retrouvent leurs valeurs lentement. Plus précisément, il est désirable de contrôler la vitesse à laquelle l'interface rouvre les doigts, afin que cette opération soit la plus intuitive possible. Pour ce faire, le taux de croissance de k est limité dans la boucle de contrôle.

Paramètres variables

La variation des paramètres d'amortissement et de raideur, dans les deux modèles d'admittance, lors d'une poignée de main est illustrée sur la figure 2.15. Ces graphes sont obtenus de façon expérimentale. Nous pouvons observer la rapidité avec laquelle les valeurs de c_F , k_P et k_F chutent jusqu'à leurs valeurs minimales lors d'une force externe détectée, tandis que c_P diminue lentement proportionnellement à la même force. Lorsque la force externe disparaît, les deux coefficients d'amortissement retrouvent immédiatement leurs valeurs maximales tandis que cette opération requiert quelques secondes pour les raideurs k_P et k_F .

2.3.2 Synchronisation des deux modèles d'admittance

Comme nous l'avons expliqué auparavant, on emploie le même signal de force pour le modèle d'admittance de la paume et pour le modèle d'admittance des doigts. Néanmoins, il faut que les positions désirées sortant des deux modèles soient synchronisées, c'est-à-dire que les deux mouvements doivent idéalement s'achever en même temps. Le signal d'entrée étant le même pour les deux contrôleurs, nous en ajustons l'amplitude avec un facteur d'échelle. Si aucun facteur n'était utilisé, on aurait une fermeture de la paume beaucoup plus rapide que celle des doigts, la rotation globale du servomoteur de la paume étant inférieure à celle du servomoteur des doigts. Le coefficient σ est alors déduit de façon expérimentale et ajouté à l'algorithme de commande, tel un gain de la force d'entrée. La figure 2.16, obtenue expérimentalement, représente l'effet de ce coefficient sur la performance de l'interface. Nous pouvons observer que si nous

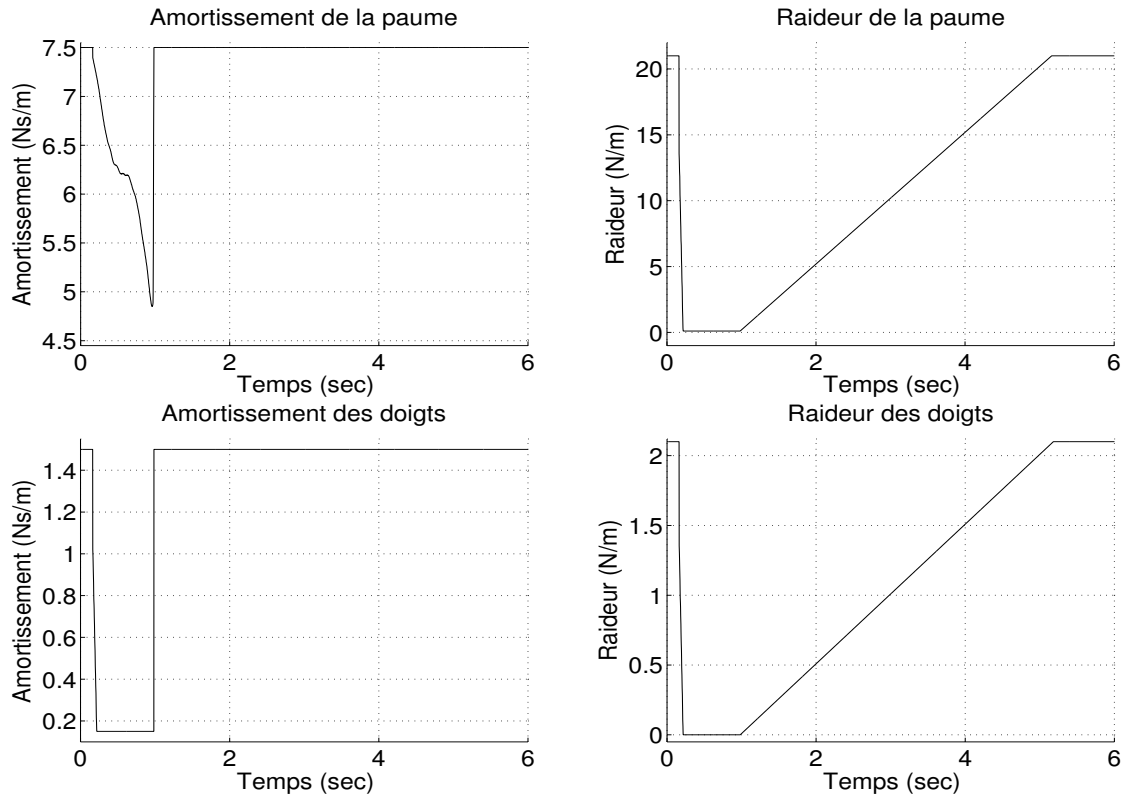


FIGURE 2.15 – Les paramètres variables dans les modèles d’admittance : dans la colonne de gauche les amortissements virtuels, dans celle de droite les raideurs virtuelles, respectivement pour le contrôleur de la paume (en haut) et celui des doigts (en bas).

n’appliquons pas ce gain ($\sigma = 1$) le servomoteur actionnant les doigts achève à peine le 30% du déplacement total.

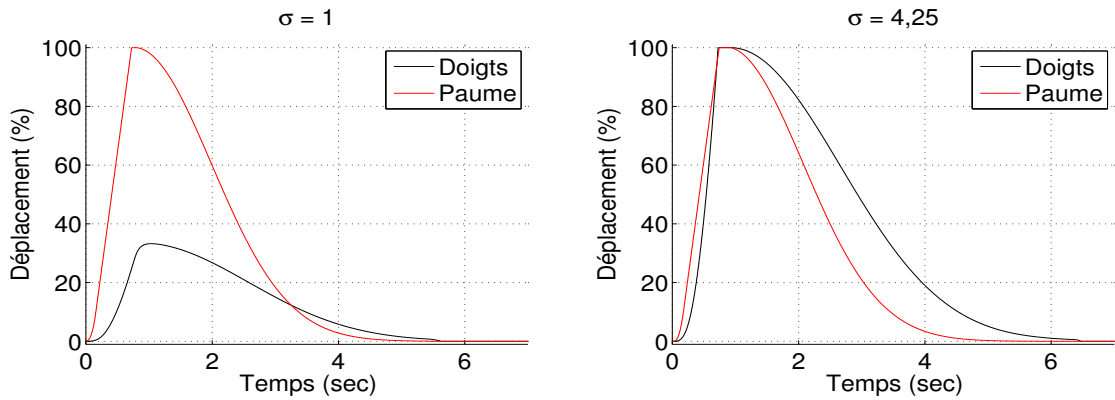


FIGURE 2.16 – Pourcentage de déplacement achevé par la paume et par les doigts pour des différentes valeurs du gain σ .

2.3.3 Le contrôleur en position

Les positions désirées de la paume et des doigts, calculées à travers les modèles d'admittance, doivent être suivies par le dispositif. Pour ce faire, nous pouvons aussi bien employer un contrôleur classique en position, tel qu'un contrôleur PID, qu'une commande par impédance. Étant donné que nous avons déjà implémenté et validé une commande par impédance pour le suivi de position dans le premier chapitre, nous avons décidé de continuer à utiliser ce contrôleur. Les deux servomoteurs à contrôler sont indépendants l'un de l'autre, ce qui signifie que nous avons deux systèmes à un degré de liberté à gérer. Nous pouvons dès lors utiliser la loi de commande décrite à l'équation 1.15. Afin d'alléger la commande, cette équation peut être simplifiée en négligeant les effets dynamiques et de gravité, $h(\dot{\theta}, \theta) \simeq 0$. La mesure directe de l'accélération n'étant pas disponible dans ce système, nous pourrions la calculer comme la dérivée seconde de la position. Cette solution donnant un signal trop bruité, le terme M_v est simplifié à la valeur nulle dans la boucle de commande. La commande employée pour le suivi de position est donc la suivante :

$$\tau = C_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_v(\theta_d - \theta) \quad (2.18)$$

Cette commande est stable et garantit de très bonnes performances de suivi de signal. Bien que la même équation soit utilisée afin de contrôler la paume et les doigts, les gains C_v et K_v sont différents dans les deux cas.

2.3.4 Contrôle de la force de serrage

Dans la première partie de cette section dédiée à la commande de l'interface nous avons concentré notre attention sur la gestion du signal de force sortant du CEP, la cellule de charge de la paume. Le signal sortant de la cellule de charge des doigts joue également un rôle dans l'interaction humain-robot, bien que cela soit différent. L'objectif de ce signal est de rendre cette interaction intuitive et sécuritaire. La figure 2.17 représente la valeur de tension dans les câbles mesurée par le CED pendant deux situations différentes. Lors d'une fermeture libre des doigts, la tension dans les câbles est basse et très loin de la valeur de seuil, comme nous allons l'expliquer par la suite du chapitre, tandis que lors d'une poignée de main la valeur de tension mesurée est beaucoup plus grande. En mesurant la tension des câbles nous pouvons en quelque sorte rendre HARRI conscient de la présence de l'utilisateur, notamment de sa main, pour qu'il puisse bien régler sa force de serrage. Néanmoins, le mode d'emploi de ce signal n'est pas évident. Deux approches sont dès lors proposées pour l'implémentation de ce que nous appelons le «

Contrôle Serrage ». Les deux approches se fondent sur le même principe : le CED sort un signal booléen, nommé F_F , lequel vaut zéro pour une valeur de tension inférieure à la valeur de seuil et 1 si, au contraire, la tension dépasse cette limite. La différence dans les deux approches consiste en une gestion différente de ce signal, tel que cela sera démontré dans la suite de cette section.

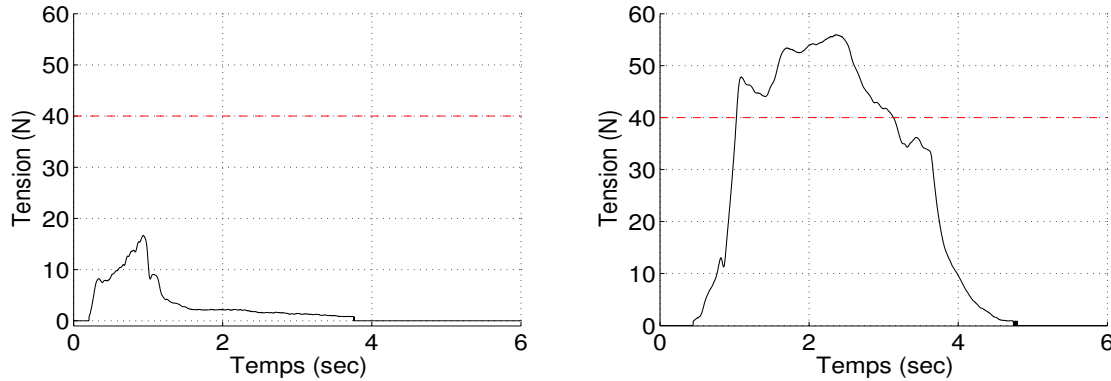


FIGURE 2.17 – Représentation de la tension dans les câbles pendant une fermeture libre, à gauche, et lors d’une poignée de main, à droite. La ligne horizontale en pointillé représente la valeur de seuil pour le bloc de sécurité.

Première approche : saturation indirecte de la position

La première approche consiste à mettre à zéro le signal de force sortant de la cellule CEP lorsque la tension limite mesurée par le CED est atteinte, c’est-à-dire que si $F_F = 1$ alors $F_P = 0$. En mettant à zéro la force F_P , on sature indirectement les positions désirées calculées par les contrôleurs en admittance. En revanche, la force F_P étant égale à zéro, les coefficients k vont lentement retrouver leurs valeurs causant une réouverture anticipée de la main. Afin d’éviter ce comportement, les raideurs virtuelles sont aussi mises à zéro lorsque $F_F = 1$. De cette façon la main se rouvre seulement lorsque l’utilisateur lâche prise. Le principal désavantage de cette approche est la perte de contrôle en temps réel du signal sortant du CEP. En outre, elle ne permet pas d’exploiter complètement la force de serrage de l’interface. Afin que tout marche bien, le seuil de tension ne doit pas être trop élevé, autrement l’interface ne lâcherait pas prise. En effet, F_P étant à zéro, si les doigts de HARRI serraient trop fort, l’utilisateur ne pourrait pas libérer sa main et la tension mesurée par le CED ne descendrait jamais en dessous de la valeur de seuil.

Cette approche, bien que simple et assez directe, présente quelques désavantages. Dès lors, une deuxième approche est proposée.

Deuxième approche : saturation directe de la position

La deuxième approche proposée pour le bloc « Contrôle Serrage » consiste à gérer directement la position désirée et non plus la force F_P . Cette deuxième approche donne en général de meilleurs résultats en termes de force de serrage et de contrôlabilité, tel que cela sera démontré dans la suite du paragraphe. Dans cette approche, la position désirée sortant du contrôleur en admittance, que ce soit pour le contrôle de la paume ou des doigts, peut être envoyée à deux blocs distincts, l'un de « saturation maximale », l'autre de « saturation contrôlée ». L'algorithme choisit le premier bloc pour $F_F = 0$, tandis que le deuxième est activé pour $F_F = 1$. La valeur de saturation maximale correspond à la limite mécanique du servomoteur. En revanche, la valeur de saturation contrôlée est égale à 120% de la valeur de la position réelle mesurée à l'instant où F_F devient 1. En résumé, lorsqu'une tension limite est mesurée par le CED, l'algorithme bloque la paume et les doigts à leur position, ou presque. La valeur de saturation n'est pas exactement égale à la position mesurée car, à cause de certains délais dans la commande, si une valeur exacte était choisie, le mécanisme devrait reculer un peu et le rendu haptique serait compromis. Le grand avantage de cette approche est d'avoir à disposition en tout temps le signal de force sortant du CEP, qui joue un rôle fondamental dans l'interaction humain-robot, tel qu'expliqué auparavant. De plus, en utilisant le même seuil de tension pour le CED, cette deuxième approche garantit une plus grande force de serrage de l'interface (environ 13 N) que celle fournie en utilisant la première approche (environ 11 N). La figure 2.18 illustre les deux différentes réponses de HARRI correspondant aux deux approches présentées. Alors que dans la première approche la force de l'utilisateur est mise à zéro pendant la poignée de main, la valeur de cette force est disponible à tout moment en utilisant la deuxième approche. Il est également possible de noter que cette dernière permet à l'interface d'exercer une force de serrage plus élevée.

2.4 Séance expérimentale

Nous avons présenté dans la section 2.2 le processus de design de l'interface et nous sommes passés par la suite à l'algorithme de commande défini pour la tâche spécifique. Dans cette section l'attention se portera sur l'interaction humain-robot, et notamment la poignée de main robotique. Quelques tests, dont l'objectif est de valider le fonctionnement du dispositif, vont dès lors être présentés.

La première étape de cette séance expérimentale sera dédiée à la validation du design de l'interface. Pendant le processus de design quelques hypothèses et quelques approxi-

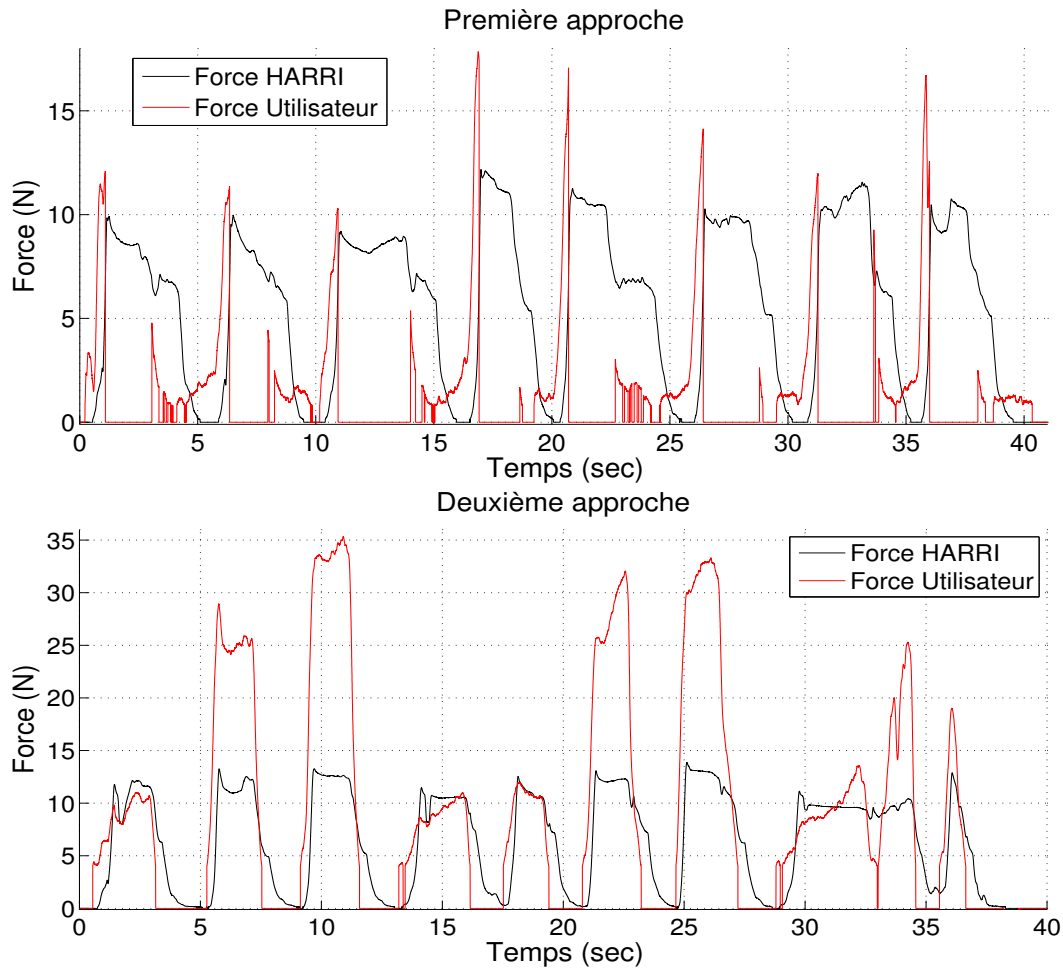


FIGURE 2.18 – Résultats d’une commande suivant la première approche de contrôle du signal du CED, en haut, et d’une commande suivant la deuxième approche de contrôle du même signal, en bas.

mations ont été faites afin de choisir certains composants de l’interface, notamment le moteur, la vis et les engrenages. Il est important maintenant de vérifier que les conditions de force et de vitesse minimales sont respectées. La question se pose : sont-elles complètement, ou du moins en partie, remplies ? Le but des tests préliminaires, présentés à la section 2.4.1, sera de répondre à cette question. Ensuite, afin d’avoir un rendu haptique plus intuitif et d’étudier la poignée de main dans son ensemble, le prototype de HARRI sera monté sur un robot KUKA LWR, fig. 2.19, qui jouera de cette manière le rôle de bras robotique. Une réelle interaction humain-robot sera dès lors implémentée. L’interface sur le robot KUKA LWR sera finalement testée par un groupe de personnes : les données relatives aux déplacements et aux forces en jeu seront enregistrées et analysées par la suite.

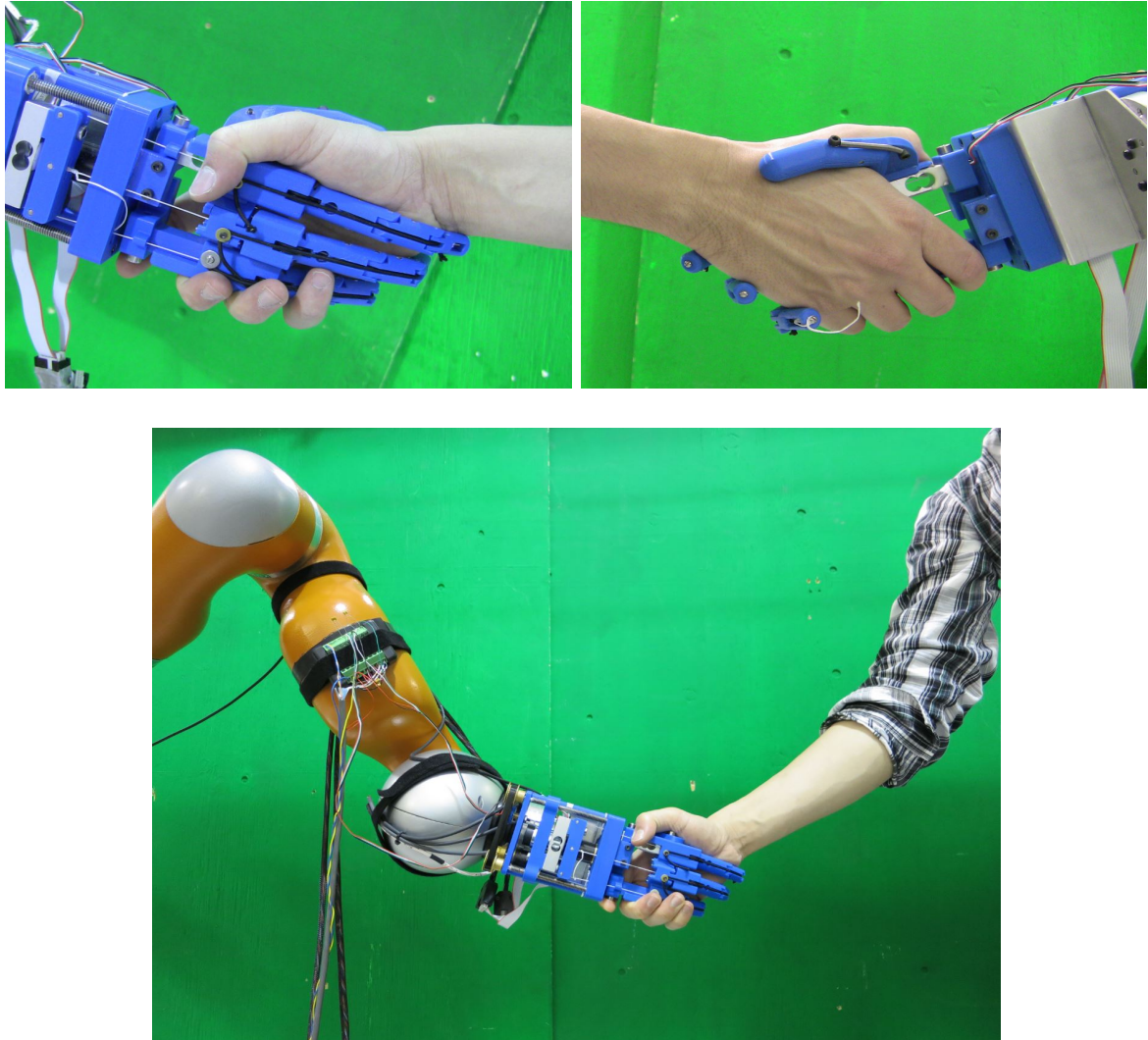


FIGURE 2.19 – Installation expérimentale de HARRI sur le robot KUKA LWR.

2.4.1 Tests préliminaires

Tel que cela a déjà été expliqué à plusieurs reprises, l'interface haptique doit satisfaire deux conditions principales : une vitesse minimale de fermeture des doigts et une force de serrage appréciable, la première contrainte étant considérée la plus importante. Nous allons maintenant vérifier de façon expérimentale que ces conditions sont respectées.

Analysons en premier lieu la vitesse. Ce terme en implique deux distincts, notamment le déplacement global et le temps relatif. Le déplacement se mesure facilement et se révèle avoir une valeur de 1,8 cm pour une fermeture complète — l'approximation étant de $\Delta X \simeq 2$ cm — et de 1,6 cm lors d'une poignée de main. Nous pouvons observer sur la figure 2.17 que la condition de vitesse est respectée : en environ 0,6 s la tension atteint

la valeur de seuil correspondant à l'instant où la poignée de main est effectuée. Il est important de remarquer qu'afin d'obtenir ce résultat, 100% de la vitesse disponible est exploitée.

Passons en second lieu à l'étude de la force en jeu lors d'une poignée de main entre HARRI et son utilisateur. Nous allons analyser deux données liées l'une à l'autre, notamment la tension des câbles et la force de serrage. La tension est directement mesurée par la cellule de charge des doigts, le CED, tandis que la force de serrage doit être mesurée de façon alternative, afin de vérifier l'approximation concernant le rapport entre la tension et la force de serrage (éq. 2.3). Le maximum de tension mesurée par le CED est d'environ 100 N, ce qui correspond à 62,5% du total. Cette valeur est beaucoup plus proche de la prévision pessimiste que de celle optimiste. Nous allons maintenant vérifier le rapport entre la tension dans les câbles et la force de serrage au moyen d'un dynamomètre (Fig. 2.20). Pour une tension d'environ 82 N mesurée par le CED, le dynamomètre détecte une force de serrage de 14 N. Par conséquent nous obtenons $\frac{T_F}{F} = 5,86$, tandis que dans la première approximation nous avons $\frac{T_F}{F} = \frac{\ell}{r_1} = 6,4$.

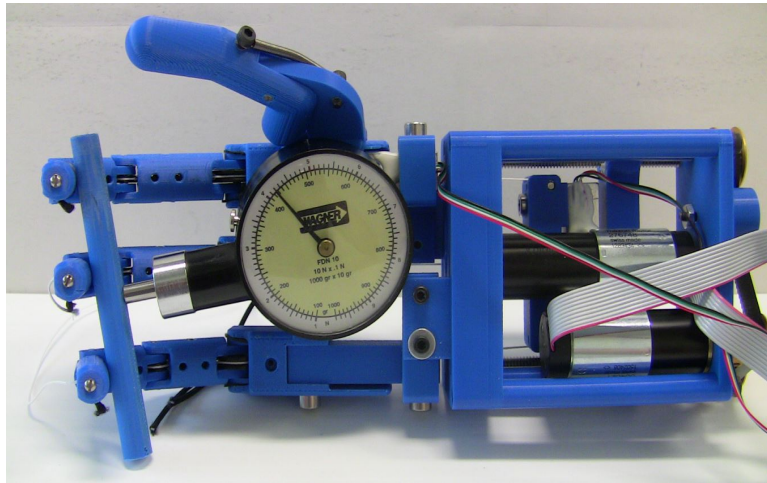


FIGURE 2.20 – La force de serrage peut être mesurée avec un dynamomètre.

Quelques observations peuvent être faites. Tout d'abord, la force que l'interface peut fournir est légèrement plus basse que celle que nous désirions obtenir. Le comportement réel de l'interface s'avère plus près de celui prévu par la projection pessimiste de la force de serrage. Ce résultat n'est pas surprenant à la vue du prototype en fonction : l'usure de la structure en ABS peut être observée spécialement là où le contact entre le métal de la vis et le plastique de la plaque arrière a lieu. Ici le coefficient de friction μ_b a des valeurs importantes, ce qui affecte significativement le rendement e . Afin d'améliorer le rendement du système, cet effet de friction pourrait être réduit. Il suffirait par exemple,

pour ce faire, de placer des couches de PTFE entre les vis et la plaque arrière. Une seconde alternative est d'utiliser un moteur plus puissant, tout en se rappelant que l'espace disponible est très limité.

En revanche, l'approximation entre la force de serrage et la tension dans les câbles est relativement bonne, car le rapport $\frac{T_F}{F}$ estimé n'est pas loin du rapport mesuré expérimentalement. En outre, cette différence joue en notre faveur, puisqu'une valeur de tension de 100 N correspond à 17,06 N de force de serrage, c'est-à-dire 68,24% de la force de serrage désirée.

2.4.2 Interaction Humain-Robot

Suite à une première analyse sur ses performances mécaniques, HARRI est monté sur le robot KUKA LWR afin d'en étudier également les capacités haptiques. Le robot KUKA LWR est commandé par impédance et par rapport à une position fixe. Des valeurs d'amortissement et de raideur très basses sont définies sur le plan de travail XZ, pour qu'il puisse être bougé par l'utilisateur sans trop de résistance sur ce plan-ci. En ce qui concerne l'interface haptique, nous suivons la première approche pour la gestion du signal sortant du CED, la deuxième approche n'étant pas encore développée.

Nous avons demandé à neuf personnes de serrer l'interface haptique comme s'ils seraient la main d'une autre personne et de commenter l'expérience, tandis que les valeurs de force et de position du robot et de l'interface étaient enregistrées. Ces données sont représentées dans le tableau 2.3. ΔX et ΔZ sont respectivement le déplacement maximal de l'interface haptique le long de l'axe X (vertical) et le long de l'axe Z (horizontal). Ces valeurs ont été obtenues en utilisant les positions sur l'axe X et sur l'axe Z de l'effecteur du robot KUKA et l'angle d'orientation du poignet, c'est-à-dire l'angle entre HARRI et l'avant-bras du robot. Les valeurs de *Force X* et de *Force Z* correspondent à la force externe mesurée à l'effecteur du KUKA par le robot lui-même. Toutes ces valeurs, les positions en x et en z , les forces et l'orientation sont fournies par le robot KUKA. En revanche, les valeurs de la force de l'utilisateur (*Force User*) et de la force de l'interface (*Force HARRI*) sont fournies par l'interface. Le premier terme, c'est-à-dire la force que l'utilisateur exerce sur l'interface, est directement mesuré par le CEP, la cellule de charge de la paume. Le deuxième, c'est-à-dire la force de serrage de l'interface, est au contraire une approximation de la tension dans les câbles mesurée par le CED.

Les commentaires des participants suite à la séance expérimentale sont très positifs : la

TABLE 2.3 – Données du test KUKA.

	ΔX (m)	ΔZ (m)	Force X (N)	Force Z (N)	Force User (N)	Force HARRI (N)
Participant 1	0,061	0,042	8,04	4,90	17,3500	12,06
Participant 2	0,097	0,061	8,97	3,53	12,2187	10,68
Participant 3	0,161	0,060	7,60	4,01	17,3484	11,13
Participant 4	0,262	0,106	24,96	10,00	14,9529	14,86
Participant 5	0,160	0,073	10,47	4,28	6,6723	9,98
Participant 6	0,089	0,042	6,94	2,78	9,8338	11,23
Participant 7	0,117	0,076	13,56	7,98	15,7861	11,33
Participant 8	0,127	0,054	17,37	8,86	30,2265	10,78
Participant 9	0,105	0,070	9,83	5,09	11,9483	10,54
V. moyenne	0,131	0,065	11,96	5,71	15,1486	11,41

poignée de main avec HARRI est unanimement jugée réaliste et très impressionnante. Tel que nous l’imaginions, quelques participants nous ont fait remarquer qu’une interface plus raide et capable d’exercer de plus grandes forces aurait toutefois été préférable. Seulement deux personnes, les participants 5 et 6, n’ont pas été du même avis, ne notant pas ce manque de force. Toutefois, le tableau 2.3 nous permet de comprendre cette différence d’opinion, puisque les participants 5 et 6 sont en effet les seuls participants dont la force appliquée lors de la poignée de main est plus petite que la force retournée par l’interface.

Il est important de noter que, théoriquement, la force exercée par l’interface haptique devrait avoir tout le temps la même valeur. Cependant, dans la réalité, cette force peut changer selon l’utilisateur : non seulement la dimension de la main de chaque participant affecte la réponse de l’interface, mais aussi la manière de saisir l’appareil peut influencer la fermeture des doigts et la force relative.

2.4.3 Discussion

La dernière rangée du tableau 2.3 résume bien cette séance expérimentale dédiée à l’interaction humain-robot. Nous pouvons observer que l’interface est déplacée principalement le long de l’axe X , qui est l’axe vertical, et, qu’en général, il n’arrive pas à rendre une force de serrage aussi grande que celle des participants, et ce à cause des limitations connues dues à la mécanique et à la commande. Le rendu haptique est tout de même très positif et tous les participants ont aimé l’expérience. La figure 2.21 constitue quant à elle une représentation graphique de la poignée de main humain-robot. Nous pouvons y observer les forces mesurées par les deux cellules de charge, les déplacements le long des axes X et Z et les forces mesurées à l’effecteur du robot KUKA. Au contraire,

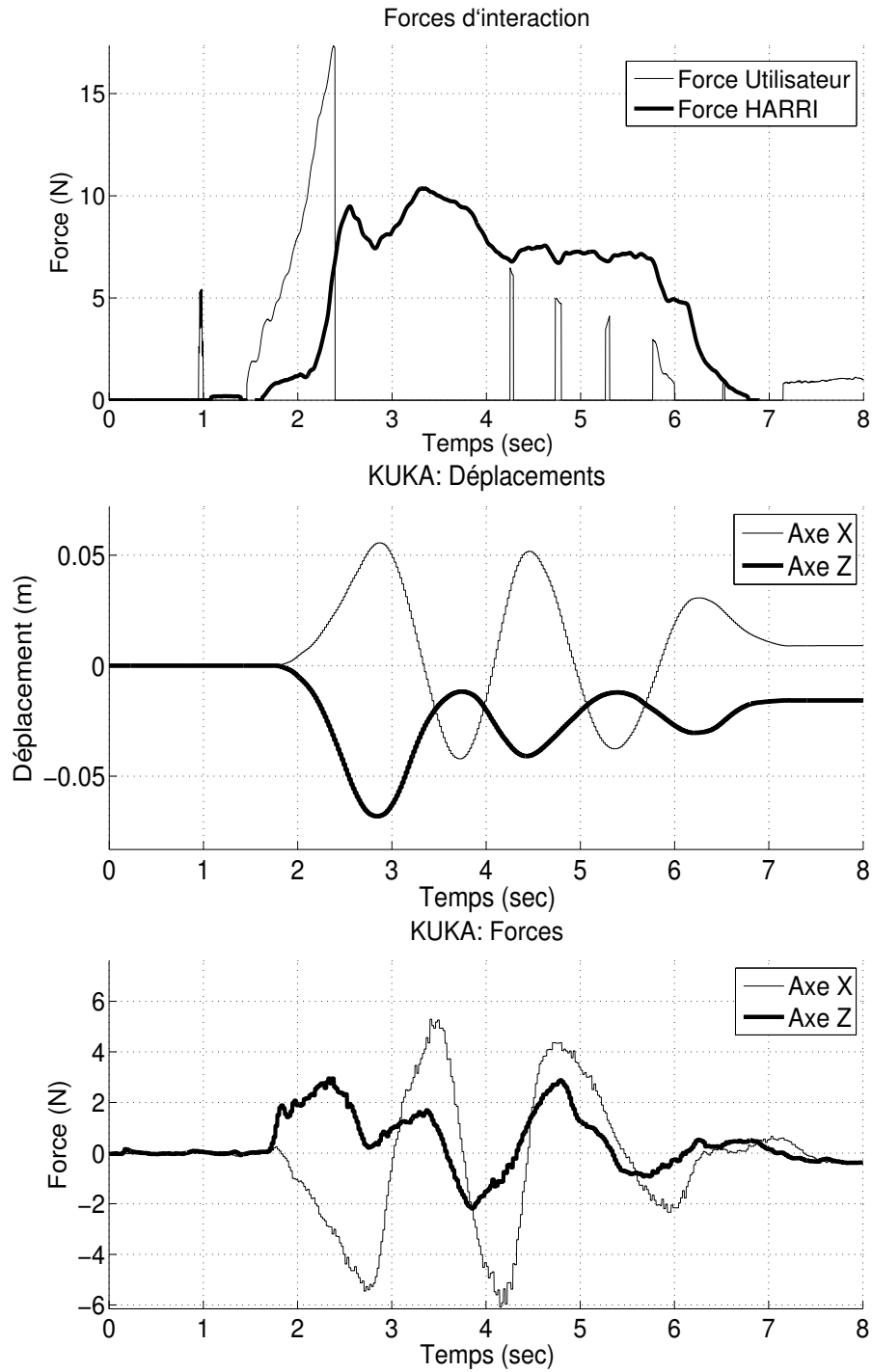


FIGURE 2.21 – Données relatives à une simple poignée de main. Les forces sont exprimées en N , les déplacements en m .

la figure 2.22 représente les trajectoires de l'interface sur le plan de travail XZ lors de deux poignées de main humain-robot.

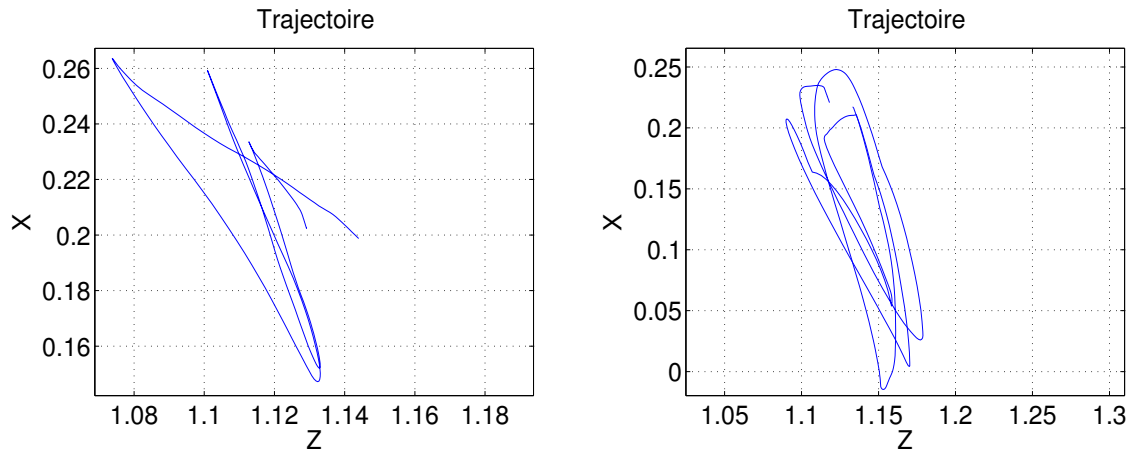


FIGURE 2.22 – Trajectoires de l’interface sur le plan XZ . À gauche, la trajectoire correspondant à la poignée de main représentée à la figure 2.21, à droite la trajectoire correspondant aux mouvements les plus étendus observés au cours de la séance expérimentale.

Le robot KUKA constitue un excellent banc d’essai, parce qu’il nous donne toutes les informations dont nous avons besoin pour étudier la poignée de main humain-robot : on connaît maintenant les déplacements du bras et les forces en jeu et ces données peuvent être très importantes si l’on décide de construire notre propre bras robotique. Le test avec le KUKA LWR nous a de plus permis de comprendre comment le rendu haptique peut changer d’une personne à l’autre. L’emploi d’une valeur de seuil fixe dans le bloc de sécurité joue, dans ce sens, un rôle fondamental. En effet, HARRI répète tout le temps la même poignée de main avec une force de serrage fixe, qui vaut environ 11N, et sa réponse est indépendante de la force de l’utilisateur. Une poignée de main de 11 N est normalement perçue telle qu’une poignée de main faible, mais cette perception peut effectivement changer d’un utilisateur à l’autre. C’est pourquoi nous allons dès lors proposer une commande adaptative, c’est-à-dire une commande qui règle la réponse de l’interface en fonction de la force appliquée par son utilisateur.

2.5 Modifications à la commande suite au test

KUKA

Suite aux commentaires des personnes ayant participé à la séance expérimentale avec le robot KUKA LWR, certains paramètres dans la commande ont été changés, afin d’aller chercher un meilleur comportement de l’interface, en particulier en ce qui concerne le rendu haptique. En effet, bien que celui-ci eut été jugé très positif, la majorité des

personnes ayant testé l'interface ont regretté un manque de force et de raideur lors de la poignée de main. Pour ce faire, deux modifications principales sont apportées. En premier lieu, les valeurs d'amortissement virtuel et de raideur virtuelle du modèle d'admittance de la paume sont modifiées, afin d'obtenir une interface plus raide. En second lieu, une nouvelle approche pour la gestion du signal sortant du CED est proposée. Son objectif est d'avoir une commande plus facile à gérer et une plus grande force de serrage. Il s'agit de l'approche de saturation directe de la position désirée présentée à la section 2.3.4. Cette nouvelle approche est un bon point de départ vers la commande finale, dénommée adaptative, qui présente un comportement variable de l'interface dépendant de la situation contingente.

2.5.1 Commande adaptative

Par commande adaptative, nous entendons une commande qui varie en fonction de l'interaction avec l'utilisateur. Au lieu d'avoir une poignée de main prédéterminée, c'est-à-dire caractérisée tout le temps par la même force de serrage, nous cherchons à implémenter un comportement de HARRI dépendant de la force appliquée par l'utilisateur. Pour ce faire, la limite de tension à laquelle la variable booléenne du CED devient « 1 » n'est plus fixe telle qu'elle l'était auparavant, mais elle est désormais variable. Plus précisément, elle varie de façon proportionnelle à la force exercée par l'utilisateur sur l'interface. Il en résulte que cette dernière serre plus fort si une plus grande force est appliquée sur elle et plus doucement lorsque la force externe est plus basse.

Avant d'implémenter une commande adaptative, une brève étude sur les forces de l'interface est nécessaire. Le point fondamental est de définir la plage de valeurs de force exerçables par HARRI. En suivant l'approche de saturation directe des positions désirées, on est capable d'obtenir des prises plus fortes de l'interface et on mesure facilement des tensions de 80/85 N. Il est important de noter que cette valeur peut aussi atteindre les 100 N. En revanche, ce résultat dépend de plusieurs facteurs, tels que la façon de saisir le dispositif et la dimension de la main de l'utilisateur, par conséquent cette valeur maximale de tension n'est pas toujours garantie. La force de serrage peut être approximée en divisant la valeur de tension dans les câbles par un coefficient, que nous avons mesuré expérimentalement à la section 2.4.1 et qui vaut 5,86. Nous pouvons dès lors reformuler le problème en termes de valeurs de forces de serrage et dire que HARRI peut arriver à serrer avec une force maximale d'environ 17 N, mais que la valeur maximale contrôlable de cette force de serrage vaut environ 14 N. Une valeur minimale est

aussi déterminée, pour une question de contrôlabilité du système. Après avoir défini les limites de force, en connaissant les valeurs de tension correspondantes, nous définissons le seuil de tension T_h comme suit :

$$T_h = a\tilde{F}_P + b, \quad (2.19)$$

où a est un coefficient d'échelle dont le but est de régler la valeur de F_P sortant de la cellule de charge de la paume et b est une valeur constante qui représente aussi la valeur minimale du seuil. Les coefficients sont ainsi définis : $a = 2$, $b = 0,3$ et le seuil de tension est limité à une valeur maximale $T_{h,MAX} = 1$ laquelle correspond à une force de serrage de l'interface d'environ $14N$. De cette façon, T_h dépend directement de la force appliquée par l'utilisateur : une plus grande force détermine un seuil plus élevé de tension et conséquemment une force de serrage plus importante. Le symbole tilde au-dessus de F_P indique que la force de l'utilisateur est limitée à une valeur maximale de $14N$. En d'autres termes, la force maximale que l'interface est censée reproduire est de $14 N$.

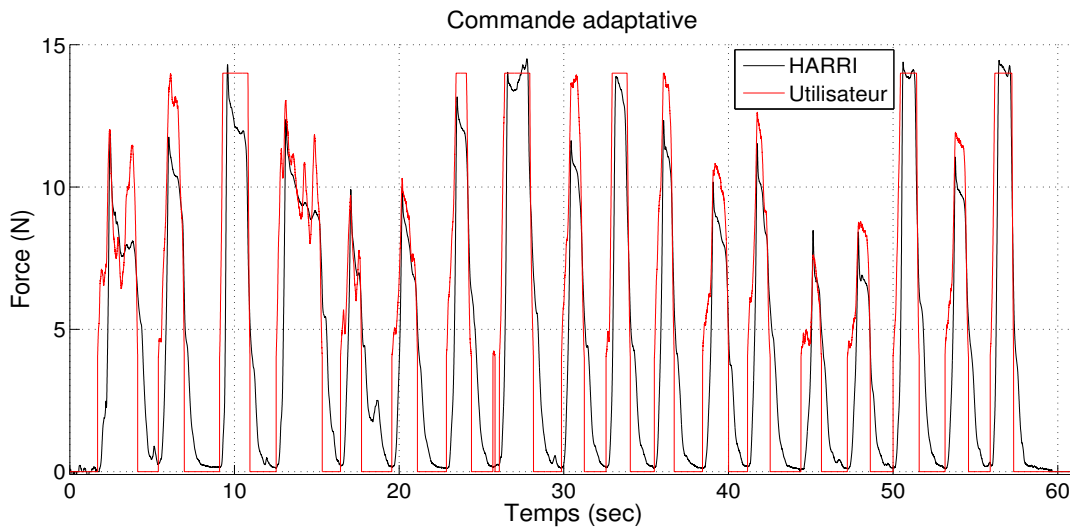


FIGURE 2.23 – Résultat d'une commande adaptative : HARRI répond convenablement aux forces externes.

La figure 2.23 illustre bien le comportement obtenu. En appliquant la limite de 14 Newton à la force mesurée par le CEP l'interface peut répondre convenablement aux stimulations externes.

Cette commande adaptative est un pas important vers la dernière étape de cette thèse, c'est-à-dire le système de communication haptique à distance constitué par deux interfaces. Nous avons désormais une interface répondant de façon proportionnelle à la force

mesurée et cette caractéristique sera fondamentale pour la communication à distance : les deux utilisateurs du système haptique, utilisant chacun leur propre interface, pourront envoyer à l'autre côté du système une commande de force de serrage personnalisée et non plus une poignée prédéterminée.

2.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le dispositif HARRI, une interface haptique anthropomorphe pour la poignée de main humain-robot. Le travail autour de ce dispositif a été divisé en deux parties différentes mais d'égale importance : d'un côté, l'analyse des conditions que l'interface doit respecter et la conception et la réalisation de celle-ci et, de l'autre, l'implémentation d'une loi de commande permettant d'exécuter correctement la tâche demandée.

En ce qui concerne le design et ses conditions nécessaires, la clef fut de trouver un bon compromis entre la force que l'interface peut générer et la vitesse de déplacement, à partir d'une puissance initiale donnée. Ces mêmes conditions furent considérées de façon différente en regardant dans un premier temps le design de la paume et successivement celui des doigts, la tâche spécifique et le servomoteur changeant pour chaque système. Nous avons cherché un système raide et très fort pour la paume, tandis que pour les doigts la possibilité de réaliser des mouvements rapides a constitué la principale condition à respecter. La friction a également été étudiée au cours de l'analyse, ce qui a conduit à une incertitude sur le résultat final. Par conséquent nous avons dédié les premiers tests expérimentaux à la vérification de nos hypothèses et à l'étude des capacités réelles de l'interface en terme de vitesse et de force.

En ce qui concerne l'algorithme de commande, nous avons repris les lois de commande présentées au chapitre 1 : la commande par admittance pour déterminer les positions désirées et la commande par impédance pour les suivre. Dans le modèle d'admittance, il a fallu définir quelques paramètres variables afin d'ajuster le comportement de l'interface et de le rendre le plus intuitif possible. Le point clef fut la gestion du signal de force sortant de la cellule CED, qui mesure la tension dans les câbles. Cette tension est le seul paramètre dont nous disposons pour connaître la position de l'utilisateur, notamment de sa main, et faire en sorte que HARRI soit conscient de sa présence. En changeant la gestion de ce signal, nous avons pu modifier significativement le rendu haptique.

Après avoir complété ces deux parties du travail, l'interface a été montée sur un robot KUKA LWR et une séance expérimentale a été proposée à un groupe de participants. Nous leur avons demandé de serrer le dispositif comme s'ils serraient la main d'une autre personne et de nous donner leur avis. L'interface haptique a réussi le test : tous les participants furent très impressionnés par le rendu haptique, malgré que quelques modifications aient été suggérées. Le problème le plus évident fut le manque de force et de raideur. L'interface haptique et le montage expérimental avec le robot KUKA LWR sont présentés dans la vidéo « Chapitre2.mp4 ».

Suite à la séance expérimentale avec le robot KUKA LWR, nous avons décidé d'apporter quelques changements à la commande afin d'améliorer le ressenti. La modification la plus significative concerne la gestion du signal sortant du CED. Une commande de type adaptative a finalement été présentée, laquelle proposait une force de serrage de l'interface dépendante de la force de l'utilisateur. La commande adaptative permet de réaliser une poignée de main personnalisée. Un aspect qui se révélera très important dans le cadre de la communication à distance entre deux personnes.

Chapitre 3

Communication haptique à distance

Ce troisième chapitre se concentre sur l'étude de la technologie haptique comme moyen de communication à distance. Cette étude est menée de façon graduelle en utilisant des dispositifs de plus en plus complexes mais dont l'objectif reste toujours le même, à savoir mettre en contact les deux côtés du système ou, dans d'autres termes, d'annuler la distance existant entre ces deux côtés. Des dispositifs plus élaborés sont capables de mieux simuler cette communication haptique mais, parfois, même un système très simple est capable de reproduire une sensation réaliste, tel que nous le verrons dans ce chapitre.

Celui-ci est organisé comme suit : dans un premier temps nous présenterons la littérature concernant l'interaction humain-humain et les dispositifs haptiques existant à nos jours. Dans un second temps l'attention se portera sur les systèmes de télé-opération développés par nous-même. En premier lieu nous prendrons en considération le système de télé-opération composé de deux mécanismes à bras de levier, lequel a été utilisé dans le chapitre 1 afin de perfectionner la commande par admittance. Ensuite, nous utiliserons le mécanisme à pince à un degré de liberté présenté à la section 2.2.1 afin de répéter l'expérience précédente avec le bras de levier en examinant les différences.

Le dernier système de communication à distance que nous présenterons dans ce chapitre est le système composé de deux interfaces anthropomorphes pour la poignée de main, c'est-à-dire le dispositif HARRI présenté au chapitre 2. Ces deux interfaces seront montées sur les deux bras d'un robot Baxter afin d'étudier les forces et les déplacements des bras et des interfaces lors d'une poignée de main entre deux utilisateurs. Dans un second temps, un mécanisme à rail vertical est conçu afin de remplacer le robot Baxter et améliorer le ressenti haptique global.

3.1 Introduction à la communication humain-humain à distance

“Without tactile communication, interpersonal relations would be bare and largely meaningless, with a minimum of affective coloring or emotional provocation, since linguistic and much of kinetic communication are signs and symbols which become operative only by evoking some of the responses which were initially stimulated by the tactile stimuli for which these signs and symbols are surrogates.”

L.K. Frank

Tel qu’affirmé par Frank [1957], en l’absence d’une communication tactile, les relations interpersonnelles seraient minimales et dans la plupart des cas dénuées de sens. La communication linguistique et kinésique est basée sur des signes et des symboles qui acquièrent une signification seulement en évoquant les réponses initialement provoquées par une stimulation tactile. La publication de L.K. Frank date des années cinquante et décrit bien l’importance du sens du toucher dans les interactions sociales. De nos jours, plusieurs chercheurs sont impliqués dans des travaux étudiant les effets du contact physique sur le comportement des personnes et leurs applications dans le système de communication interpersonnel [Register and Henley, 1992], [Jones and Yarbrough, 1985], [Montagu and Matson, 1979], [Crusco and Wetzel, 1984]. Une vue d’ensemble intéressante sur les technologies dont l’objectif est la communication à distance a été conduite par Haans and IJsselsteijn [2006].

Le sens du toucher peut être utilisé tel un médiateur entre deux utilisateurs exploitant la technologie haptique. Une distinction peut se faire lorsque l’on étudie un signal haptique : on peut parler de signal tactile ou de signal kinesthésique [Burdea et al., 1996]. Le sens du toucher devient un moyen de communication lorsqu’une personne a la possibilité de toucher une autre personne à distance par le biais d’un signal tactile

ou kinesthésique. Nous parlons donc de « mediated social touch » en anglais [Haans and IJsselsteijn, 2006]. Plusieurs bénéfices de cette interaction humain-humain que l'on peut définir plus avancée sont mentionnés dans la littérature. L'ajout d'un signal haptique dans la communication interpersonnelle peut améliorer et enrichir cette interaction [Brave and Dahley, 1997], [Chang et al., 2001], [van Essen and Rovers, 2005], [Rovers and Van Essen, 2005], [Rovers and van Essen, 2004], [Rovers and Van Essen, 2004]. En revanche, la façon dont cette amélioration et cet enrichissement ont lieu n'a pas encore été complètement clarifiée. De plus, le sens du toucher étant lié au concept d'intimité, un moyen de communication basé sur un ou plusieurs signaux haptiques permet une interaction plus personnelle, ce que des mots ou des images ne pourraient pas reproduire [DiSalvo et al., 2003], [Gemperle et al., 2003], [Mueller et al., 2005].

Dans la littérature, nous pouvons trouver beaucoup de dispositifs conçus comme étant des systèmes de communication employant les signaux haptiques. Ces dispositifs sont difficiles à cataloguer, leurs designs étant souvent très différents. Malgré leur dissemblance, ils partagent un objectif commun. Celui-ci consiste en supporter les interactions interpersonnelles aussi bien en simulant pour les utilisateurs la présence de la personne lointaine [Gaver, 2002] qu'en créant une sensation de connexion entre eux [Rettie, 2003].

Un des tous premiers designs fut le « electronic arm wrestling system » présenté par White et Back au « Strategic Arts Initiative Symposium » en 1986 et permettant à deux personnes de faire un bras de fer à distance. Malgré le retard temporel, le rendu haptique fourni par ce système a été jugé très intéressant et réaliste [Shanken, 2000].

Dans les années quatre-vingt-dix les recherches s'intéressant à l'haptique et au toucher tel qu'un moyen de communication deviennent de plus en plus courantes. Nous avons déjà décrit, dans l'introduction de cette thèse, quelques prototypes tels que le « Intouch » [Brave and Dahley, 1997] et les « Feather, Scent and Shaker » [Strong and Gaver, 1996], mais d'autres travaux peuvent être mentionnés. Parmi ceux-là, nous trouvons aussi bien des projets combinant le signal haptique avec des signaux visuels et auditifs [Dodge, 1997], [Rueb et al., 1997], que d'autres présentant une interaction uniquement basée sur l'information haptique, tel que le HandJive [Fogg et al., 1998] ou le « White Stone » [Tollmar et al., 2000].

L'intérêt de la communauté scientifique vers la communication à distance à travers l'haptique augmente dans les années deux mille. Les signaux haptiques sont désormais intégrés dans les objets quotidiens tels qu'un gilet [Mueller et al., 2005], [Cha et al., 2009], un téléphone portable [Chang et al., 2002], [Chang and O'Sullivan, 2005] ou un

coussin [McGee and Harup, 2003]. En revanche, de nouveaux dispositifs ayant pour objectif le rapprochement des utilisateurs ont également été conçus. Ceux-ci sont souvent portatifs et conçus afin de transmettre un simple signal haptique [Hansson and Skog, 2001], [O'Brien and Mueller, 2006]. Il est intéressant de mentionner également un autre type d'application de la technologie haptique dont l'objectif est d'enrichir l'expérience virtuelle normalement caractérisée par une information audio-visuelle. À titre d'exemple, nous pouvons trouver des applications visant à ajouter la perception tactile à une réalité virtuelle comme « Second Life » [Tsetserukou, 2010], [Hossain et al., 2010b], [Rahman et al., 2010b], [Hossain et al., 2010a] ou à un site web comme YouTube [Rahman et al., 2010a].

Tel que nous l'avons déjà mentionné dans cette thèse, l'interaction interpersonnelle que nous reproduirons ici est une poignée de main, laquelle sera transmise à l'utilisateur par le biais d'une interface anthropomorphe, telle que nous l'avons présentée au chapitre 2. La poignée de main joue un rôle important dans les interactions sociales entre les personnes [Schiffirin, 1974], [Hall and Spencer Hall, 1983], [Bernieri and Petty, 2011]. En revanche, peu de recherches existent concernant la poignée de main à distance entre deux utilisateurs. À titre d'exemple, une poignée de main à distance utilisant une interface PHANToM ([Massie and Salisbury, 1994]) a été proposée par Alhalabi and Horiguchi [2001]. La synchronisation d'une poignée de main entre deux personnes a été également étudiée par [Melnik et al., 2014]. La recherche la plus intéressante fut celle conduite dans les années quatre-vingt-dix par Hashimoto and Manoratkul [1996], qui présentèrent un système permettant de se serrer la main à distance sur internet. Bien que leur idée de base fut la même que la nôtre, leur interface était en revanche très simple [Kunii and Hashimoto, 1995]. Nous voulons donc reproduire un système tel que celui proposé par Hashimoto and Manoratkul [1996] mais en utilisant le dispositif HARRI présenté précédemment dans cette thèse. Pour ce faire, nous sommes passés par différents systèmes de communication avant d'implémenter le système final pour la poignée de main. Ces étapes nous ont aussi bien permis d'étudier le signal haptique et sa réception auprès d'un utilisateur humain que de valider le design de l'interface anthropomorphe en cours de réalisation.

3.2 Premier système de communication : le mécanisme à bras de levier à un degré de liberté

Le premier système que nous prenons en considération afin d'étudier la communication haptique à distance est celui composé de deux mécanismes à bras de levier, que nous avons présenté au chapitre 1. Ce système s'est révélé très utile lors de l'implémentation de la loi de commande par admittance. Le mécanisme à bras de levier étant rétro-commandable, nous avons pu ajuster cette commande afin de calculer convenablement la position à suivre. Toutefois, cela n'a pas été la seule application pour ce système. En effet, malgré que le système soit très basique, nous pouvons l'utiliser afin d'implémenter une communication haptique entre les deux côtés du système. Pour ce faire, nous utilisons un contrôle sur la position permettant d'avoir un système plus raide qu'avec un contrôle sur la vitesse, tel que nous l'avons déjà expliqué. Cette solution améliore fortement le retour de force du mécanisme.

Deux tests de différente complexité seront dès lors présentés afin d'étudier le rendu haptique fourni par le mécanisme. L'objectif est de démontrer qu'il est possible de produire une sensation de force réaliste même en utilisant un mécanisme aussi simple qu'un bras de levier à un degré de liberté.

Dans ces premières applications, en revanche, nous n'implémenterons pas une interaction humain-humain. Afin d'étudier les capacités haptiques du système, nous proposerons plutôt une interaction humain-robot. Le système sera dès lors composé d'un mécanisme maître, qui sera employé par l'utilisateur humain, et d'un mécanisme esclave qui sera guidé à distance.

3.2.1 Identification d'une séquence

Le premier test consiste en l'identification d'une séquence de ressorts. Ces ressorts sont en traction, ils ont tous la même longueur, c'est-à-dire trois pouces ($\simeq 7,6\text{ cm}$), mais une raideur différente. Les valeurs des raideurs choisies pour le test sont illustrées au tableau 3.1. Les trois ressorts peuvent être montés et démontés rapidement au bout du mécanisme représentant le télé-opérateur esclave du système, tel que cela est illustré sur la figure 3.1. L'autre mécanisme est utilisé par la personne participant au test. La commande ayant été convenablement modifiée, cette personne peut saisir son mécanisme comme une pince et le « comprimer ». Ce mouvement doit être inversé pour le mécanisme esclave, afin que le ressort soit étiré, créant ainsi une déformation. Grâce au

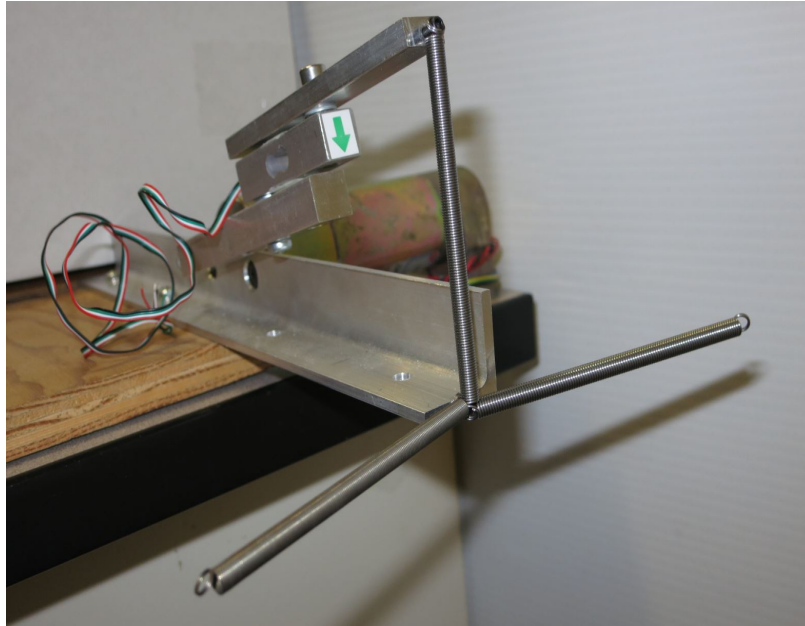


FIGURE 3.1 – Les trois ressorts sont montés au bout d’un de deux mécanisme de façon que l’on puisse les échanger rapidement : ils sont vissés à la barre horizontale et simplement accrochés au levier.

TABLE 3.1 – Raideurs des trois ressorts.

Ressort	F	M	R
Raideur	33,858 N/m	122,589 N/m	361,929 N/m

ystème de télé-opération, l'utilisateur peut ressentir cette déformation et donc la force de rappel du ressort.

En ce qui concerne la loi de commande, nous utilisons la même que nous avons introduite au chapitre 1 et qui est représentée schématiquement sur la figure 1.10. Toutefois, afin d'exécuter ce test, une légère modification à la commande s'avère nécessaire. Les ressorts étant en traction, le mécanisme esclave doit s'écarter lorsque le maître se fait comprimer par l'utilisateur. La commande illustrée sur la figure 1.10 est dès lors modifiée telle qu'elle est représentée sur la figure 3.2. Suite à la définition de la position initiale correspondant à une déformation nulle du ressort, les deux mécanismes se déplacent dans deux directions opposées par rapport à cette position initiale lors de l'application d'une force externe.

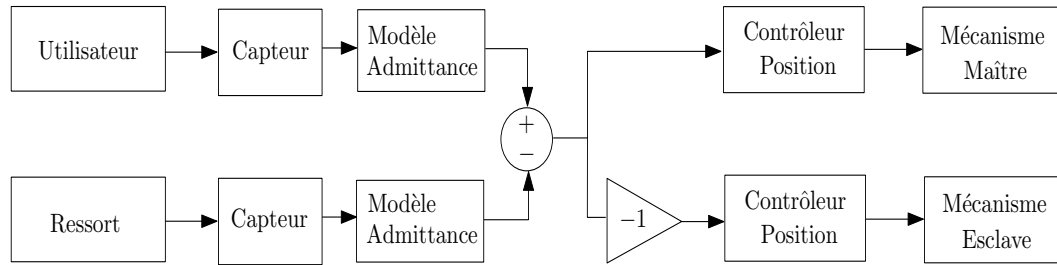


FIGURE 3.2 – Schéma de la commande par admittance modifiée pour le test d'identification d'une séquence.

TABLE 3.2 – Identification d'une séquence.

	M	F	R	M	M	F	F	M	R	R	F	<i>Score</i>
	–	↓	↑	↓	=	↓	=	↑	↑	=	↓	10
S1	–	↑	↑	↓	↑	↓	=	↑	↑	=	↓	8,5
S2	–	↓	↑	↓	=	↓	=	↑	↑	=	↓	10
S3	–	=	↑	↓	=	↓	=	↑	=	↑	↓	8,5
S4	–	↑	↑	↑	=	=	=	↑	↑	↑	↓	7
S5	–	↑	↑	=	↑	↓	=	↑	↑	=	↓	8
S6	–	↓	↑	=	=	↓	=	↑	↑	=	↓	9,5
S7	–	↑	↑	↓	=	=	↑	↑	↑	=	↓	8
S8	–	↓	↑	↓	=	↓	=	↑	↑	=	↓	10

Test

Le test consiste en dix essais. Pour chaque essai, l'un des trois ressorts est choisi et monté à l'extrémité du mécanisme esclave. Chaque ressort étant nommé selon sa raideur, nous avons un ressort faible **F**, un ressort moyen **M** et un ressort raide **R**. Lors du premier essai, le participant est censé se concentrer sur la sensation haptique fournie par son mécanisme. À partir du deuxième essai, il/elle doit répondre à la question suivante : ce ressort est-il plus, moins ou tout aussi raide que celui précédent ? Pour cette raison nous parlons d'identification d'une séquence : les participants ne doivent pas distinguer chaque ressort en sens absolu, mais le classifier par rapport à celui qui le précédait dans la séquence.

La séquence de ressorts est identique pour tous les participants. Les résultats du test, ainsi que les réponses correctes, sont illustrés au tableau 3.2. Les participants peuvent naturellement se tromper pendant le test, mais les erreurs ne sont pas toutes égales. À titre d'exemple, prenons en considération le passage du ressort moyen **M** au ressort

TABLE 3.3 – La performance moyenne de tous les participants pendant le test.

Essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pointage moyen	0,4375	1	0,75	0,875	0,875	0,9375	1	0,9375	0,875	1

faible **F**. La réponse correcte étant « moins raide », celles « tout aussi raide » ou « plus raide » sont erronées. Cependant, la dernière est diamétralement opposée à la réponse correcte et, par conséquent, est jugée davantage incorrecte. Cette distinction est utilisée dans le calcul du pointage du test, qui est illustré sur la dernière colonne du tableau 3.2. Ce pointage est calculé ainsi : un point est assigné pour une réponse correcte, un demi-point et assigné pour une erreur légère et zéro point pour une erreur plus grave. Tel que cela peut être observé sur le tableau, les réponses totalement erronées sont très rares et se produisent exclusivement au début du test.

Le tableau 3.3 représente l'évolution au cours du test des performances des participants en prenant en considération la moyenne de leurs pointages, essai par essai. Le premier essai se révèle un échec pour la majorité des participants. Fort probablement, une brève adaptation au problème et à la perception haptique est nécessaire. Cette explication est confirmée par le résultat du cinquième essai proposant la même transition, du ressort moyen au ressort faible. Le pointage du cinquième essai est exactement le double que celui du premier essai. Nous avons dès lors décidé de ne pas inclure le résultat du premier essai dans l'analyse.

Analyse

La première chose que nous pouvons analyser est le pourcentage d'identification de chaque ressort. À titre d'exemple nous pouvons prendre en considération le pourcentage d'identification du ressort **F**, lequel peut être calculé en additionnant toutes les valeurs de la cinquième, de la sixième et de la dernière colonne du tableau 3.3 et en multipliant ensuite cette valeur par un coefficient déterminé. Dans ce cas-ci, ce coefficient vaut 4,167. Cette valeur est obtenue en divisant 100 par 24 (trois essais multipliés par huit participants). De façon similaire, nous pouvons calculer les pourcentages d'identification des autres ressorts. Les résultats sont illustrés au tableau 3.4. En outre, il est intéressant de calculer également les pourcentages d'identification pour chaque transition, dont les valeurs sont regroupées au tableau 3.5.

Le résultat est assez clair. Le ressort du milieu est le plus difficile à distinguer, tandis

TABLE 3.4 – Identification de trois ressorts.

Ressort	F	M	R
Identification	93,75 %	87,5 %	93,75 %

que les deux extrémités de la séquence, c'est-à-dire le ressort faible et le ressort raide, se distinguent plus facilement, spécialement lorsqu'ils sont comparés l'un avec l'autre. La différence entre le ressort faible et le ressort raide est tellement grande que personne ne les confond. Au contraire, la combinaison la plus compliquée se révèle la transition **R – M/M – R**, avec 84,375% de succès. En effet, la raideur du ressort raide **R** vaut environ trois fois celle du ressort moyen **M**, laquelle à son tour vaut environ quatre fois celle du ressort faible **F**. La différence la plus réduite étant entre les ressorts **R** et **M**, nous aurions pu prévoir que cette transition serait la plus compliquée de la séquence.

TABLE 3.5 – Valeurs de pourcentage d'identification correcte pour toute transition possible entre deux ressorts.

%	F	M	R
F	93,75	93,75	100
M	93,75	87,5	84,375
R	100	84,375	87,5

Conclusion

Dans l'ensemble, le test fut un succès. Tous les participants furent en effet capables de distinguer les ressorts à chaque étape. Certains des participants furent même capables de désigner avec précision quel ressort ils étaient en train de manipuler.

Suite aux résultats positifs du premier test, un deuxième défi sera dès lors proposé au même groupe de volontaires. Ce deuxième test sera en revanche plus compliqué que le premier. Nous leur demanderons de reconnaître un objet et non plus une séquence et pour ce faire nous utiliserons toujours le mécanisme à un degré de liberté.

3.2.2 Identification de quatre objets

Le deuxième test que nous proposons pour le mécanisme à bras de levier consiste en l'identification de quatre objets différents. Il s'agit en quelque sorte d'une évolution du

test d'identification d'une séquence. La différence étant que la tâche ne se limite plus à la comparaison de deux sensations haptiques fournies par deux ressorts en séquence, mais par l'assignation d'un retour de force bien précis à chaque objet. Les quatre objets employés pour le test sont une balle de coton, une mousse, une balle anti-stress et une balle de tennis, tels qu'illustrés sur la figure 3.3. Les deux espaces de travail, celui du mécanisme maître et celui du mécanisme esclave, sont représentés sur la figure 3.4.

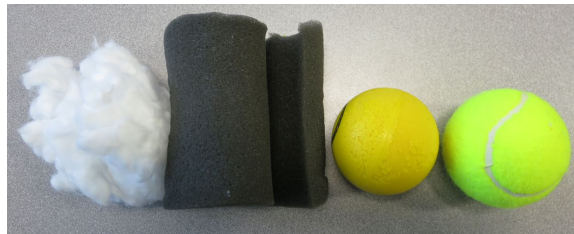


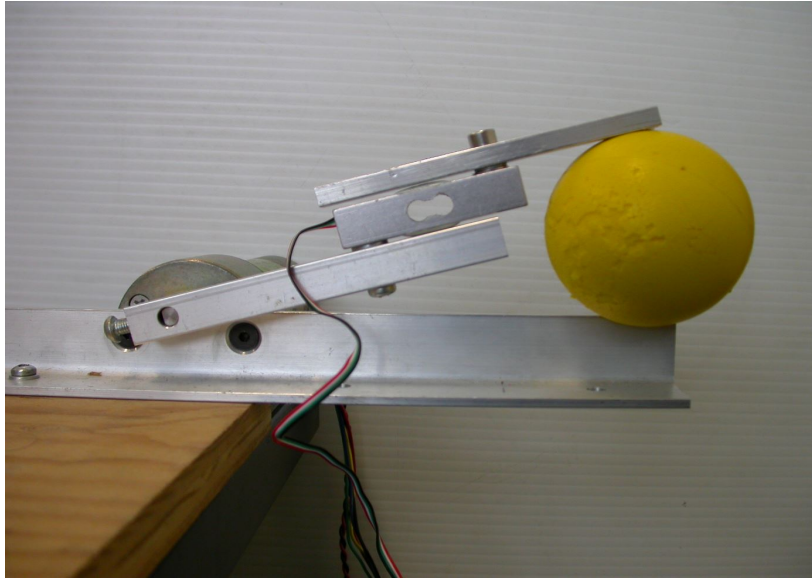
FIGURE 3.3 – Les quatres objets du deuxième test : le coton, la mousse, la balle anti-stress et la balle de tennis.

La loi de commande est toujours la commande par admittance, mais une nouvelle modification s'avère nécessaire. Lors du premier test, afin d'utiliser les ressorts en traction, nous avons implémenté un comportement tel que les déplacements du mécanisme maître étaient opposés à ceux du mécanisme esclave. En revanche, en ce qui concerne ce nouveau test, il s'agit de rétablir la commande telle qu'elle avait été développée au chapitre 1. Un mouvement de compression du mécanisme maître doit correspondre à un mouvement de compression du mécanisme esclave et vice versa. Ce comportement est résumé schématiquement sur la figure 3.5.

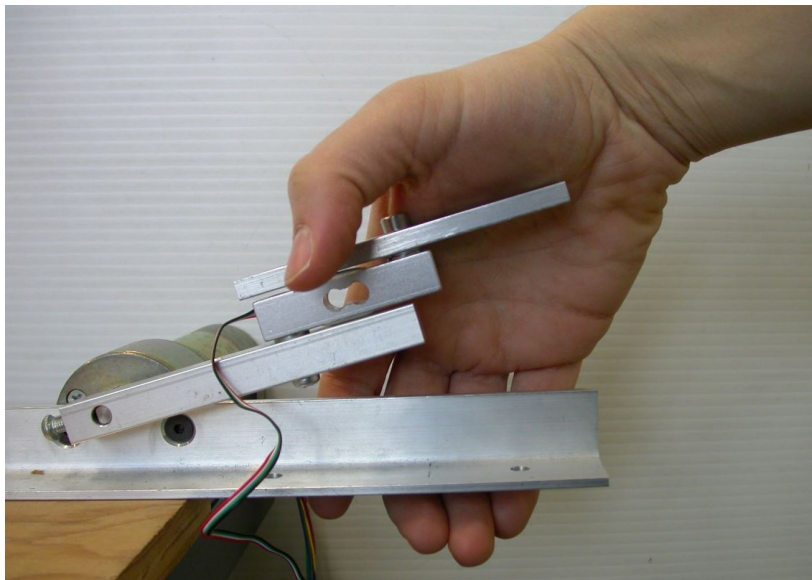
Test

Tout comme pour le premier test, huit participants volontaires sont choisis pour ce second test. Avant de commencer, nous conseillons à chacun d'entre eux de saisir ces quatre objets dans leurs mains afin d'avoir une idée plus précise de leur raideur réelle.

Le test est organisé en 4×4 essais, c'est-à-dire 16 essais divisés en quatre groupes composés de quatre essais chacun. Ces groupes sont définis afin d'avoir pour chaque objet les mêmes conditions d'identification, tel que nous allons l'expliquer. Chaque groupe est caractérisé par un ordre aléatoire des quatre objets. Toutefois, chaque groupe commence par un objet différent. Il en résulte que le premier objet du groupe 1 est le coton, celui du groupe 2 est la mousse, le groupe 3 commence par la balle anti-stress et quant au dernier groupe, il commence par la balle de tennis. Les participants étant huit, nous organisons le test afin que le premier objet de chaque séquence change tous



(a) L'espace de travail du mécanisme esclave



(b) L'espace de travail du participant

FIGURE 3.4 – Le système de télé-opération pour le test d'identification des objets.

les deux participants. En conséquence, chaque objet est testé deux fois comme étant le premier essai. Le test d'identification d'une séquence nous a appris que le premier essai peut avoir des valeurs peu significatives à cause de l'adaptation à la perception haptique. Avec cet expédient, nous évitons qu'un objet soit plus biaisé que les autres.

Les résultats sont illustrés au tableau 3.6, lequel est divisé en quatre parties correspondant aux quatre groupes de quatre essais. Il est possible d'observer que les objets de

TABLE 3.6 – Identification de quatre objets en utilisant le mécanisme à bras de levier.

S1	T S	F ✓	C ✓	S ✓	...
S2	C ✓	S F	T S	F C	...
S3	F ✓	S ✓	T ✓	C ✓	...
S4	S F	C ✓	T S	F ✓	...
S5	T F	F C	C ✓	S ✓	...
S6	C ✓	S ✓	T S	F ✓	...
S7	F C	S ✓	T S	C ✓	...
S8	S F	C ✓	T S	F C	...
(S1)	F ✓	S T	T ✓	C ✓	...
(S2)	S ✓	C ✓	T ✓	F ✓	...
(S3)	C ✓	S T	T ✓	F ✓	...
(S4)	T ✓	F ✓	C ✓	S T	...
(S5)	F ✓	S T	T ✓	C ✓	...
(S6)	S ✓	C ✓	T S	F ✓	...
(S7)	C ✓	S ✓	T ✓	F ✓	...
(S8)	T F	F C	C ✓	S T	...
(S1)	S ✓	C ✓	T ✓	F ✓	...
(S2)	F ✓	S T	T S	C F	...
(S3)	T S	F ✓	C ✓	S ✓	...
(S4)	C ✓	S ✓	T ✓	F ✓	...
(S5)	S F	C ✓	T ✓	F ✓	...
(S6)	F ✓	S T	T ✓	C ✓	...
(S7)	T S	F ✓	C ✓	S ✓	...
(S8)	C ✓	S F	T S	F C	...
(S1)	C ✓	S ✓	T ✓	F ✓	14
(S2)	T ✓	F C	C F	S T	7
(S3)	S ✓	C ✓	T ✓	F ✓	14
(S4)	F ✓	S ✓	T ✓	C ✓	13
(S5)	C ✓	S ✓	T ✓	F ✓	12
(S6)	T ✓	F ✓	C ✓	S ✓	13
(S7)	S ✓	C ✓	T ✓	F ✓	13
(S8)	F ✓	S ✓	T ✓	C ✓	7

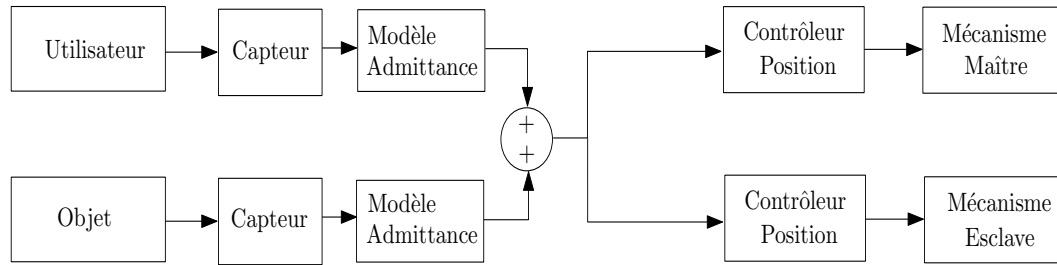


FIGURE 3.5 – Schéma de la commande par admittance modifiée pour le test d'identification de quatre objets.

départ changent tous les deux participants, tel que nous l'avons expliqué auparavant.

Dans le tableau, chaque lettre correspond à un objet : **C** correspond au coton, **F** indique la mousse, **S** correspond à la balle anti-stress et quant à **T**, il indique la balle de tennis. Chaque rangée correspond à la séquence proposée au participant et contient ses réponses : les marques cochées correspondent aux réponses correctes tandis que toute réponse erronée est marquée avec la lettre correspondant à l'objet que le participant a identifié. En effet, tel que nous l'avons fait lors du premier test, une distinction peut être établie entre les différents types d'erreur possibles. À titre d'exemple, confondre la balle de tennis avec la mousse est une erreur plus grave que de la confondre avec la balle antistress. Toutefois, en ce qui concerne le pointage, nous avons décidé de ne pas attribuer de point en fonction de la gravité de l'erreur, la tâche étant d'identifier un objet et non de le comparer aux autres. Il est tout de même intéressant de remarquer que les erreurs dites « graves » se sont reproduites seulement deux fois au cours du test. Celles-ci correspondent au premier essai du participant *S5*, qui confond la balle de tennis avec la mousse, et au cinquième essai du participant *S8*, qui fait la même erreur.

Le pointage final est affiché à la dernière colonne du tableau 3.6. Tel que nous pouvons facilement le remarquer, les résultats sont moins positifs par rapport à ceux du premier test. Cela n'est pas surprenant, le nouveau défi étant en effet plus ambitieux.

Analyse

Le résultat est illustré sur le tableau 3.7. Chaque rangée fait référence à un objet et représente les réponses données pour cet objet-ci, indiquant le pourcentage d'identification correcte et les pourcentages d'erreur. À titre d'exemple, intéressons-nous à la troisième rangée contenant les résultats d'identification de la balle antistress. Nous pouvons observer que cette dernière a été identifiée correctement 19 fois sur 32 au total (59,375%). En revanche, elle a été confondue 8 fois sur 32 (25%) avec la balle de ten-

TABLE 3.7 – Le pourcentage d’identification de quatre objets.

Objet \ Réponse	Coton	Mousse	Anti-stress	Tennis
Coton	93,75 %	6,25 %	0 %	0 %
Mousse	21,875 %	78,125 %	0 %	0 %
Anti-stress	0 %	15,625 %	59,375 %	25 %
Tennis	0 %	6,25 %	34,375 %	59,375 %

nis, 5 fois sur 32 (15,625%) avec la mousse et jamais avec le coton. Le pourcentage de 59,375% de la balle antistress est le plus bas du test, ex-æquo avec la balle de tennis. Ces deux derniers objets sont évidemment les plus difficiles à identifier et, tel que cela peut être observé sur le tableau 3.7, ils peuvent être confondus facilement l’un avec l’autre. La balle de tennis a été confondue 11 fois sur 32 avec la balle anti-stress, ce qui est un résultat assez négatif.

En effet, ce résultat aurait pu être prévu. Avant de commencer le test, nous connaissions sa complexité, et notamment celle de faire une distinction entre la balle de tennis et la balle antistress. Ces deux objets étant très raides, le mécanisme à bras de levier à un degré de liberté ne peut pas les comprimer à distance. Pour cette raison, nous avons pris en considération l’idée d’utiliser seulement trois objets pour le test, en enlevant justement l’objet le plus raide. La balle antistress atteignant déjà la limite de raideur du mécanisme, tous les objets de raideur égale ou supérieure deviennent très difficiles à distinguer. Cependant, nous avons finalement décidé de garder également la balle de tennis, afin de voir si quelques personnes auraient été capables de l’identifier.

Il est important de remarquer qu’il existe une stratégie permettant de distinguer les deux objets. De plus, nous pouvons prouver que le retour de force de ces objets est différent. Pour ce faire, nous estimons la raideur des objets utilisés au cours de la séance expérimentale. Prenons un poids de valeur connue. Nous posons ce poids sur le mécanisme maître et, en même temps, nous plaçons un objet sur le mécanisme esclave. En mesurant le déplacement angulaire du mécanisme maître, nous pouvons également estimer la raideur angulaire de l’objet placé sur le mécanisme esclave en utilisant la formule suivante :

$$K_R = \frac{M}{\theta} \quad (3.1)$$

où θ est la rotation causée par M , le moment de force. Assumant que la force est appliquée verticalement — ce qui est une bonne approximation, l’angle étant d’environ

dix degrés — nous calculons le moment de force comme suit :

$$M = Fr \tag{3.2}$$

où r est le bras de levier et F la force appliquée correspondant à mg , m étant la masse utilisée pour la mesure et g l'accélération gravitationnelle. $\Delta\theta$ étant mesuré et m connu, nous pouvons estimer les valeurs de raideur de chaque objet. Ces valeurs sont illustrées au tableau 3.8.

Il faut bien noter que la différence entre la balle antistress et la balle de tennis n'est pas aussi évidente que ce qu'elle pourrait sembler. En réalité, $\Delta\theta$ vaut pour les deux objets respectivement quatre et deux degrés, avec $m = 0,5$ Kg. Cette différence peut donc être perçue mais la tâche n'est pas aisée. La stratégie gagnante devrait être d'imposer un mouvement très lent au mécanisme, afin de pouvoir percevoir la légère différence entre la balle antistress et la balle de tennis, cette dernière causant un déplacement inférieur à la balle antistress. Cette stratégie fut effectivement adoptée par quelques participants. D'autres adoptèrent la stratégie opposée, que l'on pourrait nommer une stratégie de collision : en déplaçant très rapidement le mécanisme ils peuvent frapper l'objet et l'identifier grâce à la vitesse de rebond. À titre d'exemple, les deux meilleurs participants, c'est-à-dire le premier et le troisième, ont adopté respectivement les deux stratégies opposées, lesquelles semblent donc bien fonctionner. Globalement, seulement deux participants sur huit ont échoué au test, c'est-à-dire le deuxième et le huitième participant. Ce dernier a même affirmé à la fin du test qu'il réussissait juste à distinguer les deux objets plus mous, c'est-à-dire la mousse et le coton, des deux objets plus raides, c'est-à-dire la balle antistress et la balle de tennis, sans pouvoir les distinguer entre eux.

TABLE 3.8 – Raideurs des quatre objets présentés estimées à travers le premier système de télé-opération.

Raideur angulaire	Coton	Mousse	Anti-Stress	Tennis
N m / rad	0,729	2,453	9,109	18,219

Conclusion

En conclusion nous pouvons affirmer que le test d'identification des quatre objets ne fut pas un succès, au contraire du premier test d'identification d'une séquence. Toutefois, il ne fut pas non plus un échec. En effet, la majorité des participants ont tout de même réussi à assigner à chaque objet un retour de force et parfois même à distinguer les

deux objets les plus raides, bien que ceux-ci furent souvent confondus. En revanche, le test n'est pas un succès car les erreurs d'identification des objets les plus raides sont trop nombreuses. Le mécanisme à bras de levier à un degré de liberté ne réussit pas à fournir le retour de force nécessaire. Il faut dès lors un moteur plus puissant ou bien un dispositif haptique plus élaboré. Pour cette raison, le test d'identification des quatre objets sera proposé de nouveau avec un autre dispositif haptique.

3.3 Second système de communication : le mécanisme à pince à un degré de liberté

À la section 2.2.1 du chapitre 2, nous avons présenté le design d'un mécanisme à pince à un degré de liberté. Tel que nous l'avons alors expliqué, le mécanisme a été conçu comme étant aussi bien la structure portante que la paume de la future interface anthropomorphe ressemblant à une main. Ce mécanisme à pince jouant un rôle fondamental dans la future interface, nous avons décidé de le tester avant de continuer le design du dispositif. Cette section est dédiée à l'étude du mécanisme à pince et à l'analyse de ses capacités haptiques.

Dans la section 3.2 de ce chapitre nous avons présenté deux tests haptiques différents, lesquels ont été proposés à un groupe de personnes utilisant un dispositif haptique très élémentaire, c'est-à-dire le mécanisme à bras de levier à un degré de liberté. Tel que nous l'avons démontré, ce dernier se révéla capable de fournir un retour de force suffisant afin de reconnaître une séquence de ressorts, mais non pas pour une identification d'objet. Nous avons conclu que cette tâche requiert un moteur plus puissant et une interface haptique plus développée capable de produire un meilleur ressenti haptique. En raison de tout cela, nous avons décidé de reproposer ce test afin de tester le mécanisme à pince. Un nouveau système de télé-opération est dès lors défini. Ce système est désormais composé de deux mécanismes à pince remplaçant les mécanismes à bras de levier. Au contraire, la loi de commande est la même que celle que nous avons employée à la section 3.2.2. La figure 3.6 représente les deux espaces de travail du mécanisme maître et du mécanisme esclave.

3.3.1 Test d'identification de quatre objets

Le test est organisé tel qu'à la section 3.2.2. Huit personnes y prennent part, dont certaines avaient également participé à la séance expérimentale avec le premier système

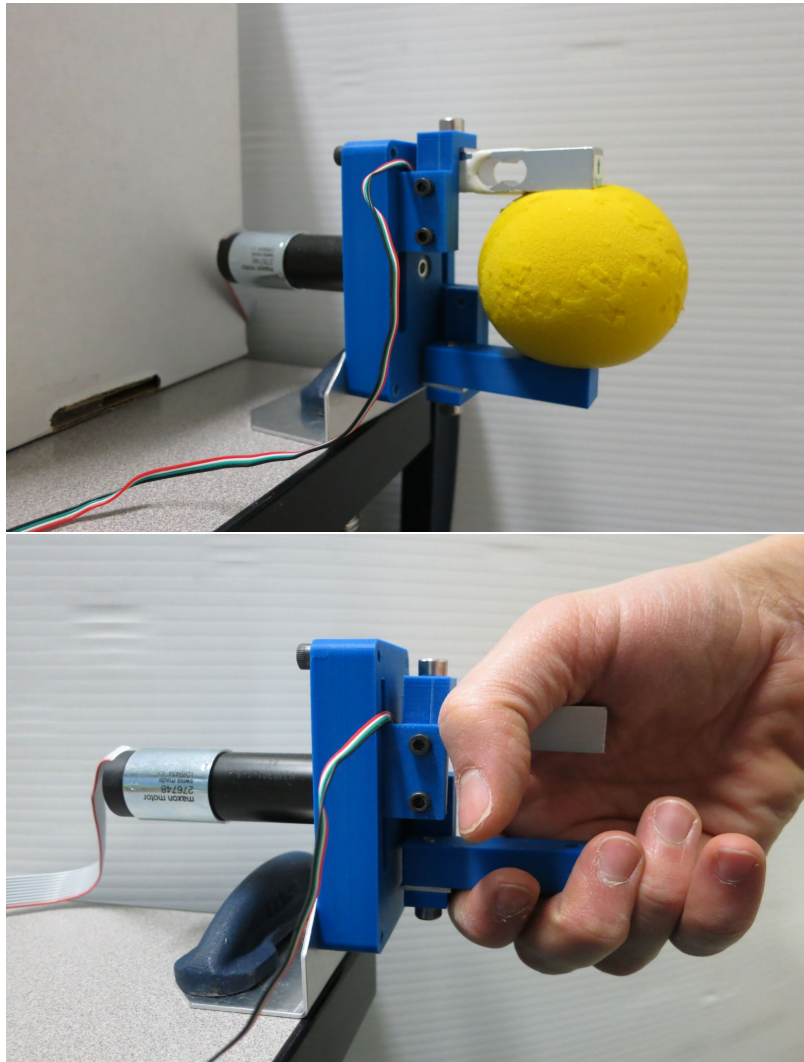


FIGURE 3.6 – Les deux mécanismes à pince composant le système de télé-opération lors de la séance expérimentale. La figure du haut illustre un mécanisme à pince saisissant la balle antistress. La figure du bas représente l'autre côté du système, avec un des participants saisissant l'autre mécanisme.

de télé-opération. Les résultats sont illustrés au tableau 3.9. Même avant de commencer l'analyse, les résultats de ce deuxième test d'identification apparaissent meilleurs que ceux du premier test d'identification. Le pointage moyen de 13,125/16 est déjà plus élevé que celui du premier test, lequel valait 11,625/16. De plus, nous pouvons tout de suite remarquer qu'aucun participant n'a échoué au test, le pointage minimal étant de 11/16.

TABLE 3.9 – Identification des quatre objets en utilisant le mécanisme à pince.

S1	T ✓	F C	C ✓	S ✓	...
S2	C ✓	S ✓	T ✓	F C	...
S3	F ✓	S T	T ✓	C ✓	...
S4	S F	C ✓	T ✓	F C	...
S5	T ✓	F ✓	C ✓	S ✓	...
S6	C ✓	S T	T ✓	F ✓	...
S7	F ✓	S ✓	T ✓	C ✓	...
S8	S F	C ✓	T ✓	F ✓	...
(S1)	F ✓	S ✓	T ✓	C ✓	...
(S2)	S ✓	C T	T ✓	F ✓	...
(S3)	C ✓	S ✓	T ✓	F C	...
(S4)	T ✓	F ✓	C ✓	S ✓	...
(S5)	F ✓	S ✓	T ✓	C ✓	...
(S6)	S ✓	C ✓	T ✓	F ✓	...
(S7)	C ✓	S T	T ✓	F ✓	...
(S8)	T ✓	F ✓	C ✓	S T	...
(S1)	S ✓	C ✓	T ✓	F ✓	...
(S2)	F ✓	S T	T ✓	C ✓	...
(S3)	T ✓	F C	C ✓	S ✓	...
(S4)	C ✓	S T	T ✓	F ✓	...
(S5)	S ✓	C ✓	T S	F ✓	...
(S6)	F ✓	S ✓	T ✓	C ✓	...
(S7)	T ✓	F ✓	C ✓	S ✓	...
(S8)	C ✓	S T	T ✓	F ✓	...
(S1)	C ✓	S ✓	T ✓	F ✓	15
(S2)	T S	F ✓	C ✓	S ✓	12
(S3)	S F	C ✓	T ✓	F ✓	12
(S4)	F C	S ✓	T S	C ✓	11
(S5)	C ✓	S ✓	T S	F ✓	14
(S6)	T ✓	F ✓	C ✓	S ✓	15
(S7)	S T	C ✓	T ✓	F S	13
(S8)	F ✓	S ✓	T ✓	C ✓	13

3.3.2 Analyse

Afin de pouvoir comparer ces nouveaux résultats à ceux du premier test, nous allons suivre la même procédure que celle proposée auparavant. Nous pouvons également répéter l'estimation de la raideur des objets par le biais du système de télé-opération. Le déplacement de la pince étant linéaire, nous allons estimer la raideur des objets comme suit :

$$K = \frac{F}{\Delta x}, \quad (3.3)$$

où Δx est le déplacement linéaire du mécanisme esclave provoqué par F , la force externe. Cette dernière est appliquée verticalement et est égale à mg , où g représente l'accélération gravitationnelle et m indique la masse connue du poids placé sur le mécanisme maître. Les valeurs de raideur des quatre objets sont illustrées au tableau 3.10. En ce qui concerne la différence entre la balle antistress et la balle de tennis, les déplacements Δx valent respectivement 3,34 mm et 1,905 mm. Les proportions entre les raideurs représentées au tableau 3.10 ressemblent beaucoup aux proportions que nous avons trouvées entre les raideurs angulaires représentées au tableau 3.8.

TABLE 3.10 – Raideurs des quatre objets présentés estimées à travers le premier système de télé-opération.

Raideur	Coton	Mousse	Balle Anti-Stress	Balle de tennis
N / m	68,43	221,33	578,6	1029,92

Les résultats du deuxième test d'identification sont représentés sur le tableau 3.11. Nous pouvons remarquer quelques différences importantes entre les deux tests d'identification d'objets. En premier lieu, nous avons pu observer au cours de cette séance expérimentale un changement de stratégie de la part des participants. Le mécanisme à pince étant

TABLE 3.11 – Le pourcentage d'identification de quatre objets lors du test avec le mécanisme à pince.

Objet \ Réponse	Coton	Mousse	Antistress	Tennis
Coton	100 %	0 %	0 %	0 %
Mousse	18,75 %	78,125 %	3,125 %	0 %
Antistress	0 %	9,375 %	62,5 %	28,125 %
Tennis	0 %	0 %	12,5 %	87,5 %

plus raide et plus lent que le mécanisme à bras de levier, la stratégie de collision n'est désormais plus utilisable. De plus, les participants sont apparus beaucoup plus sûrs de leurs réponses et le test s'est écoulé plus rapidement. En second lieu, nous pouvons comparer les pourcentages d'identifications illustrés sur le tableau 3.11 à ceux représentés sur le tableau 3.7. Nous constatons que les pourcentages d'identification du coton, lequel atteint désormais 100%, de la balle antistress et de la balle de tennis augmentent, tandis que celui de la mousse ne change pas de valeur. Le changement concerne davantage la balle de tennis, dont le pourcentage d'identification dépasse désormais celui de la balle antistress et de la mousse.

Ce résultat démontre que le mécanisme à pince est capable de fournir un retour de force suffisant au test. L'objet le plus raide et celui le plus mou sont les plus faciles à identifier, conformément à ce que l'on devrait attendre d'un test d'identification. Les participants sont désormais capables de distinguer les quatre objets, malgré qu'ils puissent toujours se confondre avec un objet qui ne soit ni très mou ni très raide, tel que la balle antistress.

La vidéo « Chapitre3_1.mp4 » présente le système de communication avec le mécanisme à pince à un degré de liberté. Une brève démonstration du test d'identification est présentée également, afin de démontrer la réponse du mécanisme lorsque deux objets différents, la mousse et la balle anti-stress, sont maniés à distance.

Conclusion

En conclusion, nous pouvons affirmer que ce second test d'identification des quatre objets, réalisé avec le nouveau système de télé-opération, donne de meilleurs résultats que le premier test. Les participants ont démontré une plus grande assurance pendant l'exécution de la tâche et leurs commentaires concernant le rendu haptique furent très positifs. Le mécanisme à pince étant plus raide, le rendu haptique se révéla meilleur que celui du mécanisme à bras de levier.

Le test d'identification des quatre objets a été très important pour la continuation du travail de design de HARRI. Ce test nous a confirmé que la future paume de l'interface anthropomorphe était suffisamment raide et capable aussi bien de résister aux forces externes que d'exercer un effort en traction ou en compression.

3.4 Système de communication final : le dispositif HARRI

La dernière section de ce chapitre est enfin dédiée à l'interaction humain-humain, laquelle est implémentée en utilisant deux interfaces anthropomorphes pour la poignée de main (HARRI), qui ont déjà été présentées au chapitre 2. Le dispositif HARRI a été étudié, dans un premier temps, dans une interaction de type humain-robot et il a été programmé afin de répondre convenablement aux forces externes. De plus, le contrôleur de la paume a été ajusté afin de garantir une bonne raideur de celle-ci, laquelle simulait bien la raideur de la main humaine. Afin de valider le design de l'interface et d'en étudier les capacités haptiques auprès d'un utilisateur humain, le dispositif a été monté sur un robot KUKA LWR, lequel a joué dès lors le rôle de bras mécanique. Toutefois, ce bras ne répondait pas aux forces externes appliquées par l'utilisateur, se limitant à se laisser déplacer dans l'espace de travail. Malgré que le mouvement du KUKA soit très naturel, il ne peut pas vraiment remplacer le bras humain, son comportement étant exclusivement passif. Tel que nous l'avons proposé pour un système implémentant l'interaction humain-robot avec une seule interface anthropomorphe, afin de reproduire un système de télé-opération pour l'interaction humain-humain nous utiliserons dans un premier temps un robot commercial comme étant le banc d'essai. Dans cette nouvelle application, nous emploierons le robot Baxter [Robotics, 2014], qui a deux bras pouvant porter chacun un dispositif HARRI, tel qu'illustré sur la figure 3.7. Ensuite, les interfaces anthropomorphes seront montées sur deux mécanismes à rail permettant des déplacements verticaux. En dépit de sa simplicité, le système composé de deux mécanismes à rail garantit de meilleures performances par rapport au robot Baxter, tel que ce sera expliqué par la suite.

Dans la première application avec le robot Baxter, les deux bras de ce dernier sont programmés pour suivre la même trajectoire que l'on applique sur n'importe quel côté. Toutefois, à cause de certaines limitations du contrôleur du robot, nous avons décidé de commander seulement deux de ses articulations, en l'occurrence les articulations e_1 et w_1 représentées sur la figure 3.8, tous les autres articulations étant bloquées. Cette commande nous a permis d'obtenir des déplacements horizontaux et verticaux et de ressentir de façon appréciable les mouvements appliqués sur l'autre bras. Toutefois, à cause desdites limitations du robot Baxter, nous n'avons pu implémenter un comportement « à miroir » des deux joints. Théoriquement, alors qu'un mouvement vertical dirigé vers le haut du bras gauche correspond à un mouvement égal du bras droit, un

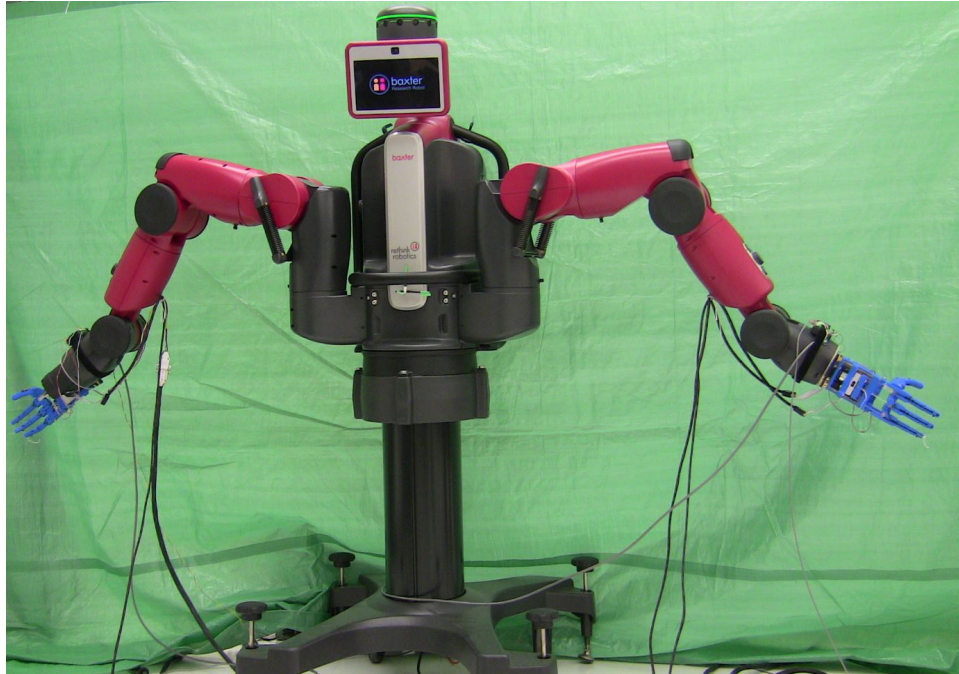


FIGURE 3.7 – Le robot Baxter équipé de deux interfaces HARRI.

mouvement horizontal dirigé vers le corps du robot du bras gauche doit correspondre à un mouvement opposé du bras droit, lequel doit s'éloigner du corps du robot. Ce comportement à miroir n'a pas été implémenté. Il est cependant important de remarquer que, tel que nous l'avons observé au cours du test avec le robot KUKA LWR, les mouvements horizontaux ont une importance secondaire par rapport aux mouvements verticaux. Pour cette raison, le comportement du robot Baxter est acceptable malgré l'absence du comportement à miroir, lequel affecte exclusivement les mouvements horizontaux. En effet, il affecterait également les rotations qui n'ont pas été considérées dès le début, afin de ne pas compliquer la commande.

En ce qui concerne le deuxième système pour la poignée de main à distance, nous utilisons la commande par impédance définie auparavant, comme nous le verrons dans la suite de la section.

Cette dernière présente en premier lieu la loi de commande pour les deux interfaces anthropomorphes, dont l'objectif est d'obtenir un système transparent pour la poignée de main à distance.

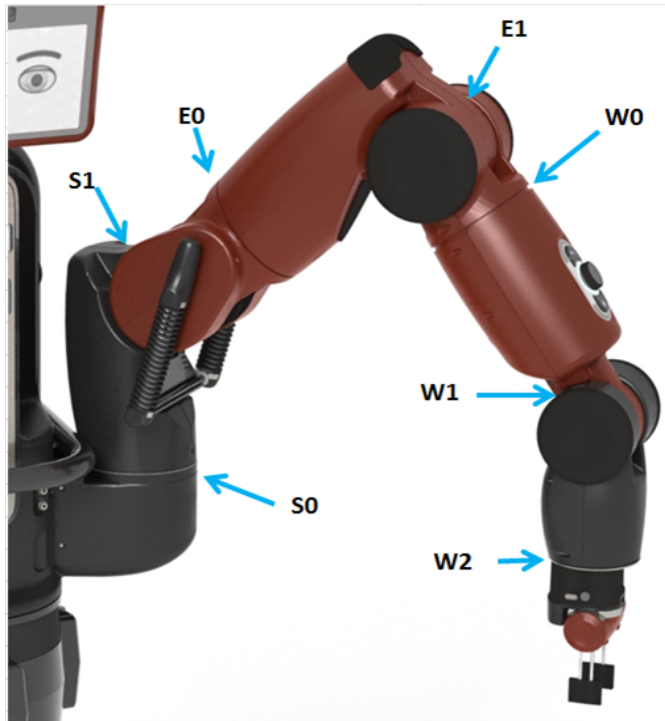


FIGURE 3.8 – Les articulations du robot Baxter [Robotics, 2014].

3.4.1 Commande

Afin d'implémenter l'interaction humain-humain, il faut développer une loi de commande incluant aussi bien deux utilisateurs que deux interfaces haptiques dans la boucle de rétroaction. Nous partons donc de la commande implémentée lors de l'interaction humain-robot afin d'obtenir la commande définitive. Avant de décrire en détail cette dernière, il est important de rappeler que l'interface a deux rôles principaux : en premier lieu, elle doit mesurer la force que son utilisateur applique sur elle ; en second lieu, elle doit reproduire sur son utilisateur la force que le deuxième utilisateur est en train d'appliquer sur la deuxième interface. Ce comportement est illustré sur la figure 3.9. L'objectif est donc d'avoir un système transparent. Pour ce faire, l'interface doit représenter dans l'espace de travail de son utilisateur la main de l'autre personne participant à l'interaction à distance et réagir en conséquence. Pour cette raison, une force appliquée sur l'interface A provoquera la fermeture des doigts de l'interface B. En même temps, la paume de l'interface A se fermera jusqu'à ce que la fermeture des doigts B soit achevée.

La commande pour l'interaction humain-humain est représentée schématiquement sur la figure 3.10. Cette commande suit le même principe que celle présentée au chapitre 2,

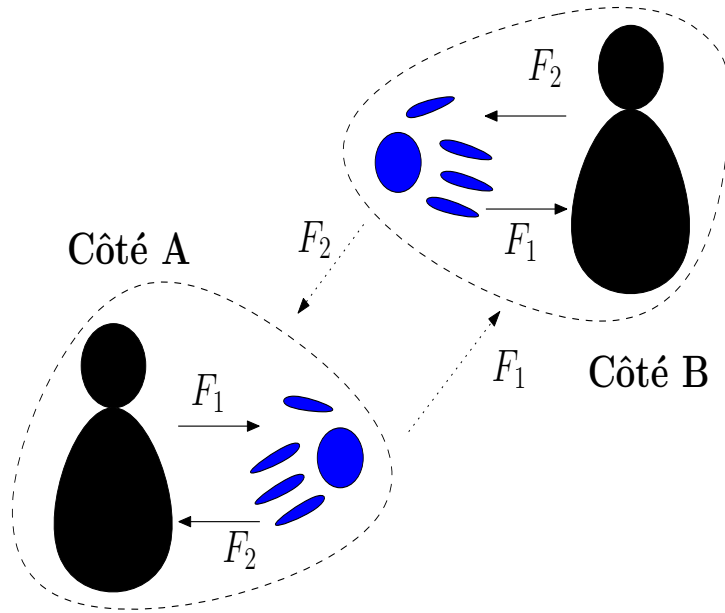


FIGURE 3.9 – Représentation schématique du système de communication final.

à ceci près que certains signaux sont désormais croisés entre les deux côtés du système. En premier lieu, ceux de la commande des doigts, lesquels se referment selon la force appliquée sur l'autre interface. En second lieu, le signal mesuré par la cellule de charge des doigts. Ce signal indique la présence de la main de l'utilisateur et devient indispensable dans l'implémentation d'une commande adaptative, telle que nous l'avons présentée à la section 2.5.1, afin que l'interface serre la main de son utilisateur avec la force désirée. Dans une interaction humain-humain, la force désirée correspond à la force exercée par l'autre utilisateur. Par conséquent, l'interface A doit serrer la main de l'utilisateur A avec une force égale à la force de serrage que l'utilisateur B applique sur l'interface B ($F_{P,B}$). La force de serrage de l'utilisateur B est donc utilisée afin de déterminer le seuil de tension de l'interface A, et vice versa. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{aligned} T_{h,A} &= a\tilde{F}_{U,B} + b, \\ T_{h,B} &= a\tilde{F}_{U,A} + b \end{aligned} \quad (3.4)$$

Les termes $T_{h,A}$ et $T_{h,B}$ représentent les deux seuils de tension, a et b étant les mêmes valeurs constantes de l'équation 2.19. Le symbole tilde au-dessus de F_P , avec $i = 1, 2$, indique que les forces des utilisateurs sont limitées à une valeur maximale de 14 N. En d'autres termes, les interfaces ne sont pas supposées reproduire des forces majeures de 14 N. Cette limite a été expérimentalement mesurée comme étant la valeur de force de serrage maximale que l'interface peut reproduire en temps normal.

Le contrôle de la paume se fait également avec un signal croisé. Le mouvement de la

paume est important pour le rendu haptique final et il doit être le plus réaliste possible. Dans le cas d'une interaction humain-robot, nous avons ajusté les paramètres du contrôleur de la paume afin que cette dernière ait un comportement très raide et qu'elle résiste bien à la force de serrage de l'utilisateur. Dans le cas d'une interaction humain-humain, la caractéristique principale de l'interface est la transparence. L'utilisateur ne doit pas ressentir des interférences de la part de son dispositif, lequel est supposé reproduire le signal haptique tel que mesuré par l'autre dispositif sans rien y ajouter. La raideur de la paume A sera dès lors dépendante de l'utilisateur utilisant l'interface B. Si personne n'utilise le deuxième dispositif, l'utilisateur serrant le premier dispositif ne doit idéalement pas ressentir de résistance, comme s'il serrait le vide. Pour cette raison, les paramètres du contrôleur de la paume sont définis de façon à ce que celle-ci soit beaucoup moins raide que dans le cas d'une interaction humain-robot. En revanche, il faut que la paume soit très raide lors d'une vraie poignée de main. Pour ce faire, le signal de force envoyé au contrôleur par admittance de la paume est défini comme étant un signal composé : il est égal à la force appliquée par l'utilisateur auquel on soustrait la force de serrage de l'interface de l'autre côté du système. La force de serrage d'une interface a été estimée expérimentalement comme étant la force mesurée par la cellule de charge des doigts divisée par 5,86, tel que nous l'avons expliqué à la section 2.4.1. Lors d'une poignée de main, le signal en entrée du modèle d'admittance devient égal à zéro si les deux utilisateurs serrent avec la même force. En outre, les deux utilisateurs ressentiront la raideur du mécanisme à pince.

Il est important de remarquer que la solution proposée est basée sur des approximations. En premier lieu, nous estimons la valeur de force de serrage comme étant égale à 5,86 fois la valeur de tension dans les câbles, mais il s'agit ici d'une mesure expérimentale. Une deuxième approximation, plus significative, concerne la valeur de force de serrage de l'interface, laquelle ne peut pas être contrôlée directement. En utilisant la deuxième approche pour le contrôle de la force de serrage et en imposant une commande adaptative telle qu'illustrée à la section 2.5.1, nous gérons la force de serrage en contrôlant la position des doigts. Hélas, cette stratégie ne permet pas une commande précise de la force de serrage. Chaque position des doigts correspond à quelques exceptions près à une force de serrage de l'interface, mais d'autres paramètres imprévisibles affectent le résultat final. Ces paramètres sont par exemple la vitesse, la force ou la durée de la poignée de main ainsi que la dimension de la main de l'utilisateur. Pour cette raison, la même force appliquée par l'utilisateur peut provoquer une réaction différente de l'interface haptique selon l'approche de ce premier.

Le système de télé-opération schématisé sur la figure 3.10 sera validé au cours d'une séance expérimentale, tel que cela sera présenté dans la suite du chapitre.

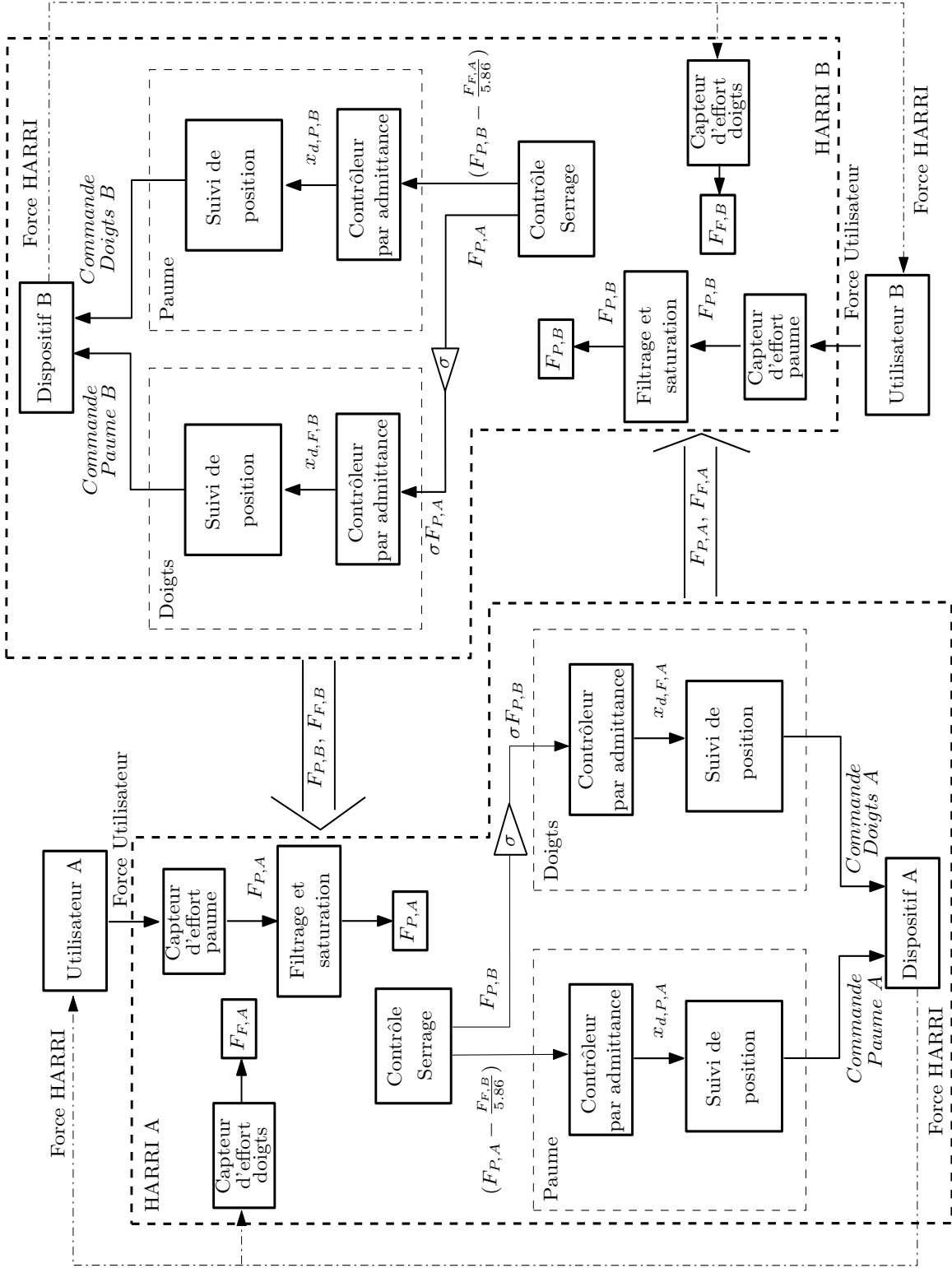


FIGURE 3.10 – Commande pour l'interaction humain-humain utilisant deux HARRI.

3.4.2 Robot Baxter pour la poignée de main à distance

L'objectif de cette séance expérimentale est d'étudier le système de télé-opération pour la poignée de main à distance aussi bien en sauvegardant et en analysant certaines données quantitatives, telles que les forces échangées et les positions des interfaces dans l'espace de travail, qu'en rassemblant les commentaires et les conseils éventuels des participants afin d'améliorer le système.

Un test est proposé et organisé comme suit. Huit personnes, divisées en deux groupes de quatre personnes chacun, participent à la séance expérimentale. Pour chaque groupe, tout participant doit serrer la main de tous les autres, ce qui donne six combinaisons possibles par groupe et douze au total. Nous pouvons étudier de cette façon si le comportement des participants change par rapport à la personne avec laquelle ils interagissent.

La figure 3.11 représente deux personnes se serrant la main par le biais du système de télé-opération composé de deux interfaces HARRI et du robot Baxter.

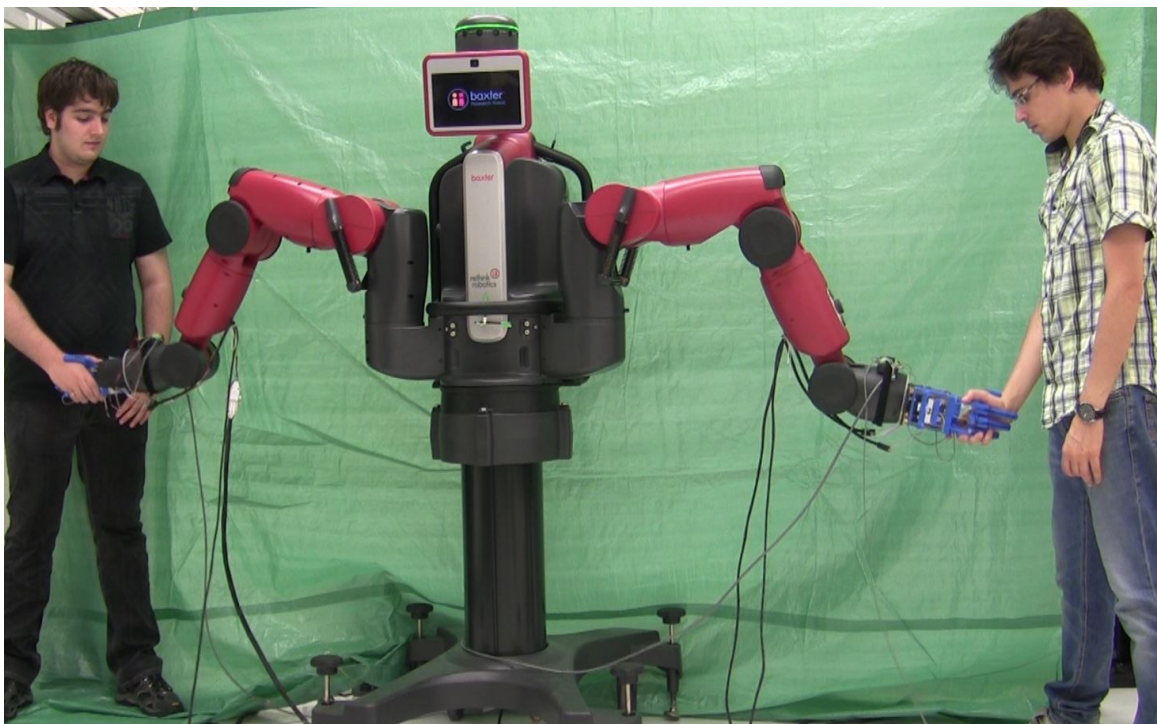


FIGURE 3.11 – Deux personnes se serrant la main à distance par le biais des deux interfaces HARRI montées sur le robot Baxter.

Analyse des données

Lorsque nous voulons évaluer une interface haptique, nous pouvons nous concentrer aussi bien sur une évaluation qualitative que sur une évaluation quantitative de cette interface. L'évaluation de type qualitatif est très importante puisqu'elle se concentre sur le rendu haptique que cette interface est capable de fournir. Nous nous demandons si cette dernière reproduit ou non le comportement que l'on souhaite et si ce comportement est réaliste et intuitif. En revanche, étant donné que cette évaluation qualitative relève d'une perception personnelle, nous ne pouvons pas prouver rigoureusement que notre système fonctionne correctement. Pour cette raison, il est souvent nécessaire de définir certains paramètres qui pourront être étudiés afin d'évaluer quantitativement et mathématiquement l'interface.

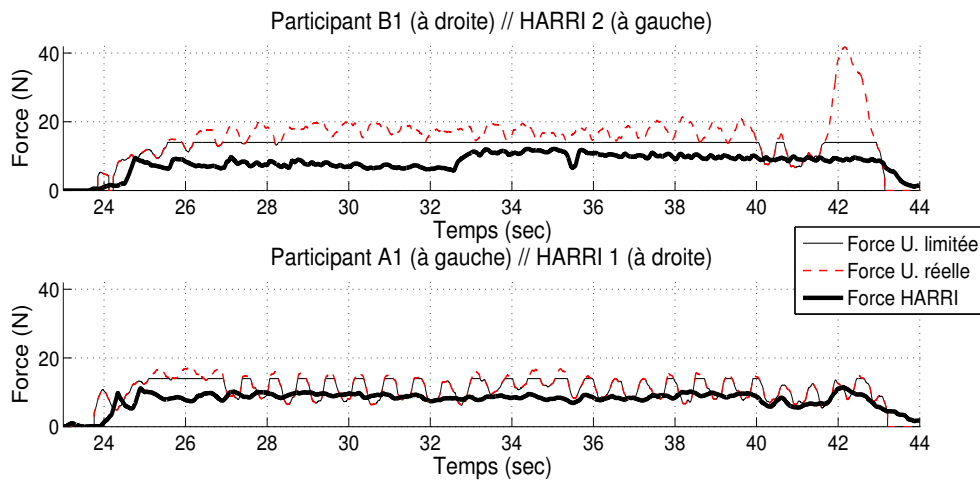
Dans cette interaction humain-humain de poignée de main à distance, nous avons principalement deux types de paramètres à étudier, tel que cela sera démontré par la suite. En ce qui concerne l'évaluation qualitative du système, nous faisons référence aux commentaires des participants rapportés dans la suite du chapitre.

Forces échangées entre les utilisateurs à travers le système de communication

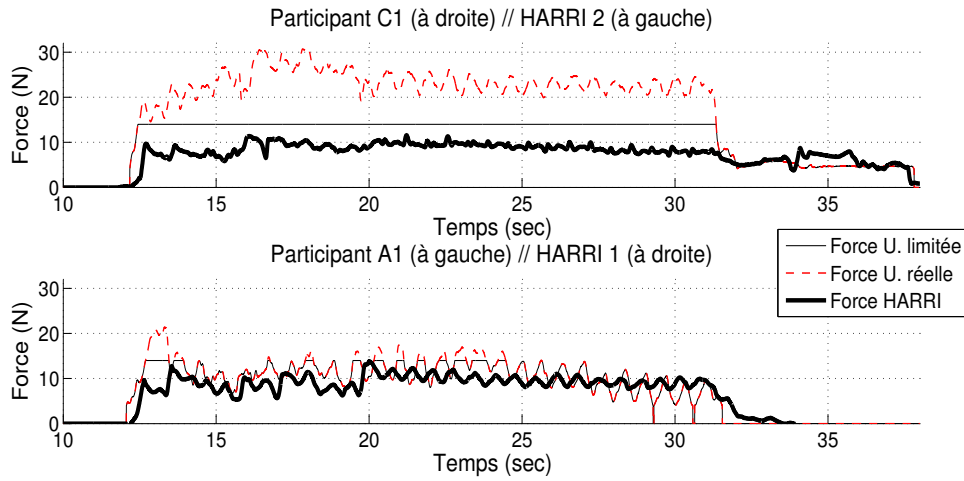
En premier lieu, nous analysons les forces échangées entre les utilisateurs à travers le système de télé-opération. Les figures 3.12 et 3.13 illustrent les forces de serrage des participants et les forces de serrage respectives exercées par les interfaces se trouvant à l'autre côté du système. À titre d'exemple, sur la figure 3.12a, nous pouvons observer, en haut, la force de serrage du participant B1 serrant l'interface montée sur le bras droit du Baxter et la force de serrage de l'interface montée sur le bras gauche du robot serrant la main du participant A1. Dans l'idéal, afin d'avoir un système 100% transparent, une interface devrait serrer avec une force égale à celle que le deuxième utilisateur applique de l'autre côté du système. Dans la pratique, ce comportement est impossible. En effet, l'interface haptique comporte certaines limitations de force et de vitesse. L'interface ne peut donc pas répondre convenablement lorsque l'utilisateur dépasse ces limites.

Prenons quelques exemples. Les figures 3.12c, 3.13a, 3.13b, 3.13c, 3.13d, 3.13e représentent des situations où la force des utilisateurs ne dépasse pas, du moins durant la plupart du temps, la valeur limite de 14 N, c'est-à-dire la force que l'interface peut reproduire. Dans ces cas-ci, la réponse de l'interface est cohérente avec la force mesurée de l'autre côté du système. En revanche, lorsque les utilisateurs appliquent de grandes

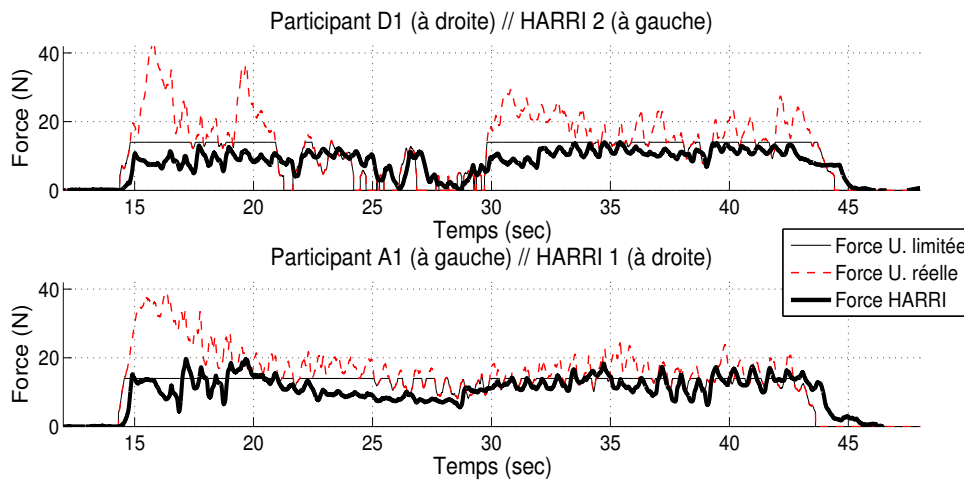
forces sur les interfaces, celles-ci ne sont pas capables de reproduire la même force de serrage et le système n'est plus transparent. L'autre utilisateur ressent une poignée très faible par rapport à ce qu'il devrait ressentir. Nous pouvons observer ce comportement sur les figures 3.12a, 3.12b, 3.12d, 3.12e, 3.12f où au moins un utilisateur exerce sur l'interface une force bien au-dessus de la valeur limite de 14 N . L'interface répond bien par rapport à ses capacités en appliquant la force de serrage maximale. Parfois, malgré qu'une force externe très élevée soit mesurée d'un côté, l'interface de l'autre côté n'atteint même pas sa limite de force, tel qu'illustré par exemple sur la figure 3.12d. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que les deux utilisateurs serrant très fort, les interfaces restent coincées et n'arrivent pas à réagir convenablement. Cela dépend également de la façon dont l'utilisateur saisit le dispositif, car nous pouvons observer que dans d'autres cas, où la force externe est même plus élevée, les interfaces répondent correctement (Fig. 3.12f). La figure 3.13f illustre un cas particulier où l'un des participants, l'utilisateur D2, exerce une pression très faible tout au long de l'expérience. Nous pouvons remarquer que la force de serrage produite par l'interface est souvent plus grande que celle de l'utilisateur correspondant. Ce comportement s'explique par le fait que la force appliquée par l'utilisateur descend souvent au-dessous de la limite de force minimale que l'interface peut exercer, c'est-à-dire environ 8 N .



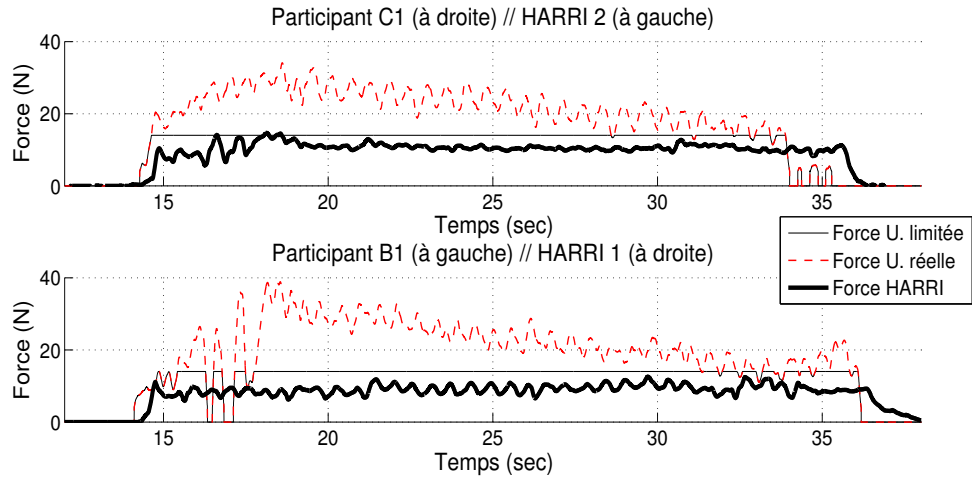
(a) Participants A1 et B1



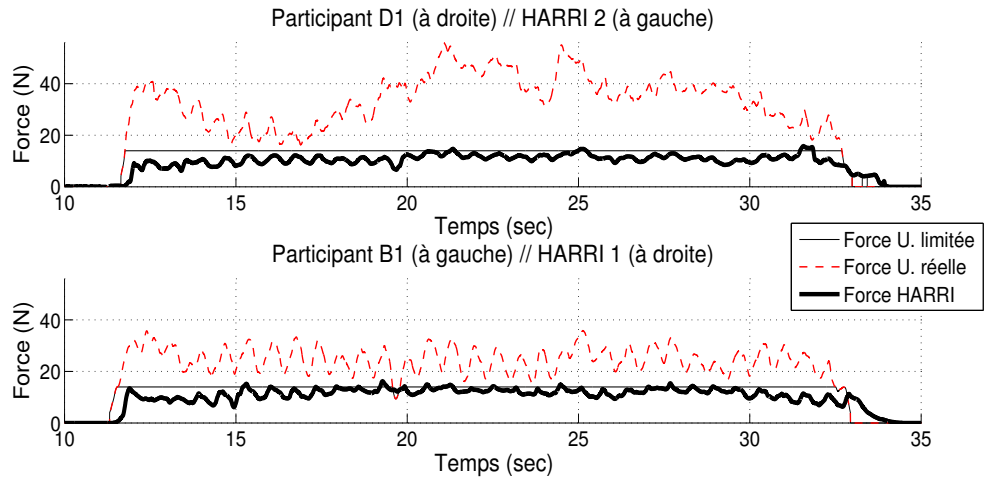
(b) Participants A1 et C1



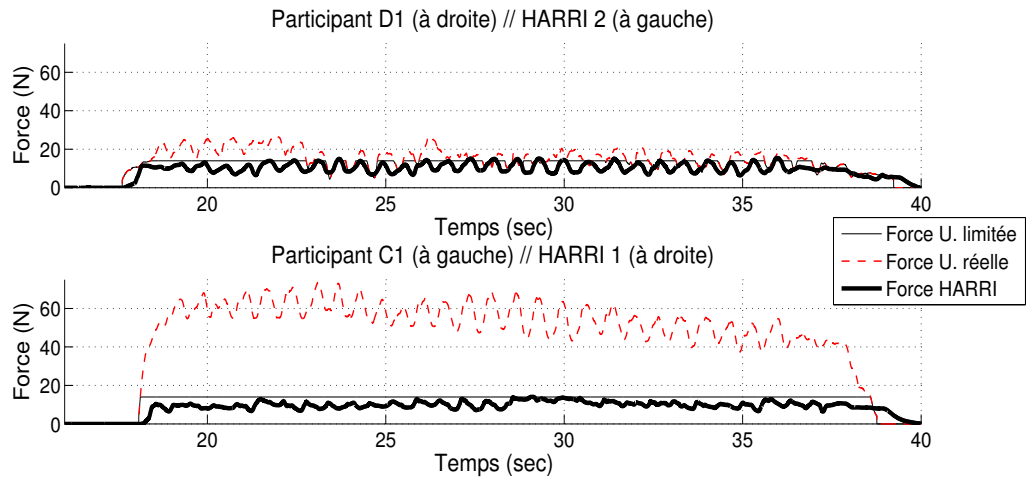
(c) Participants A1 et D1



(d) Participants B1 et C1

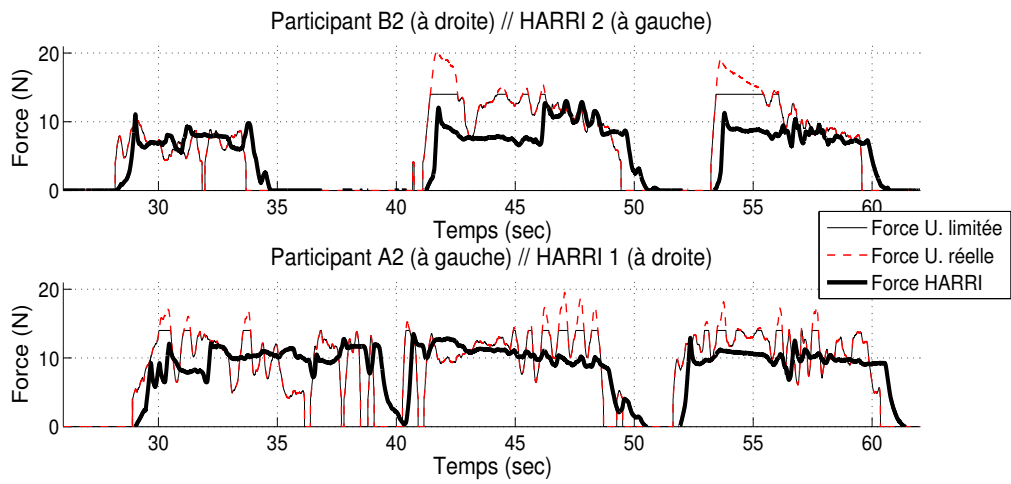


(e) Participants B1 et D1

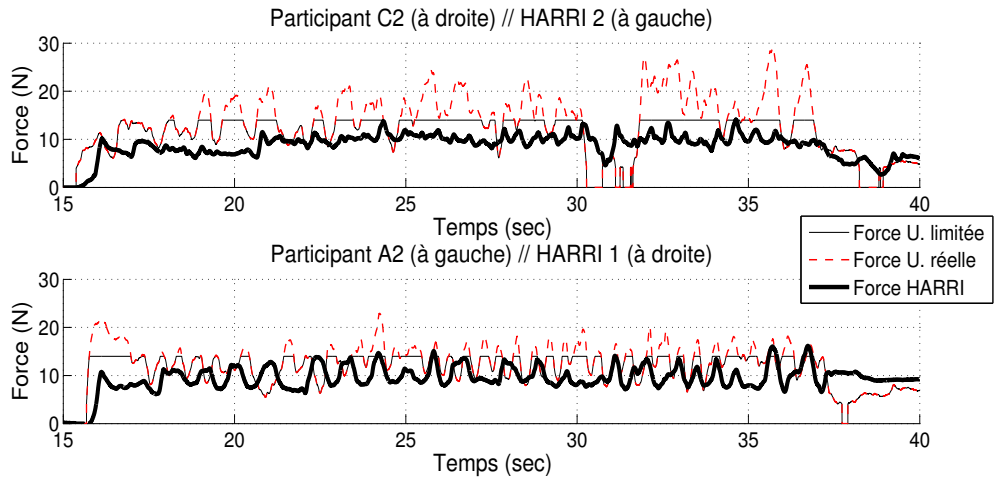


(f) Participants C1 et D1

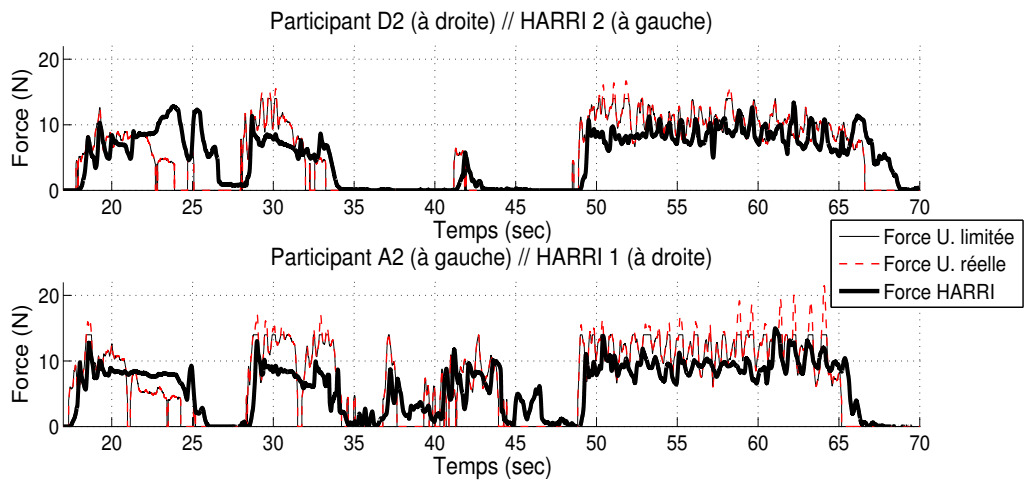
FIGURE 3.12 – Groupe 1 : Forces échangées entre les utilisateurs à travers le système de communication.



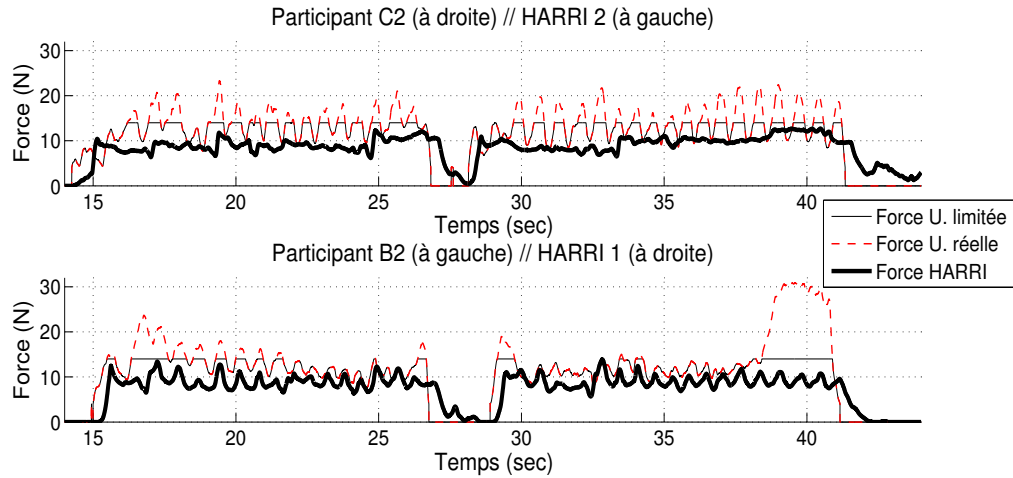
(a) Participants A2 et B2



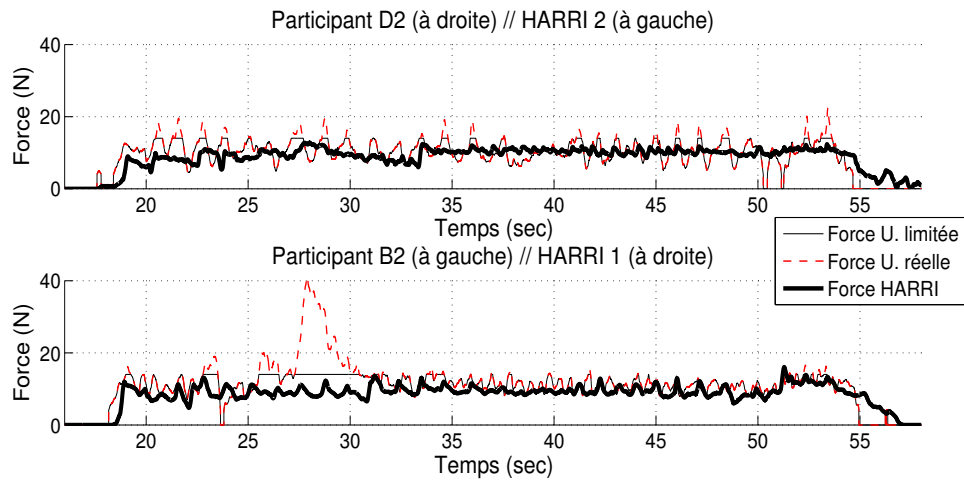
(b) Participants A2 et C2



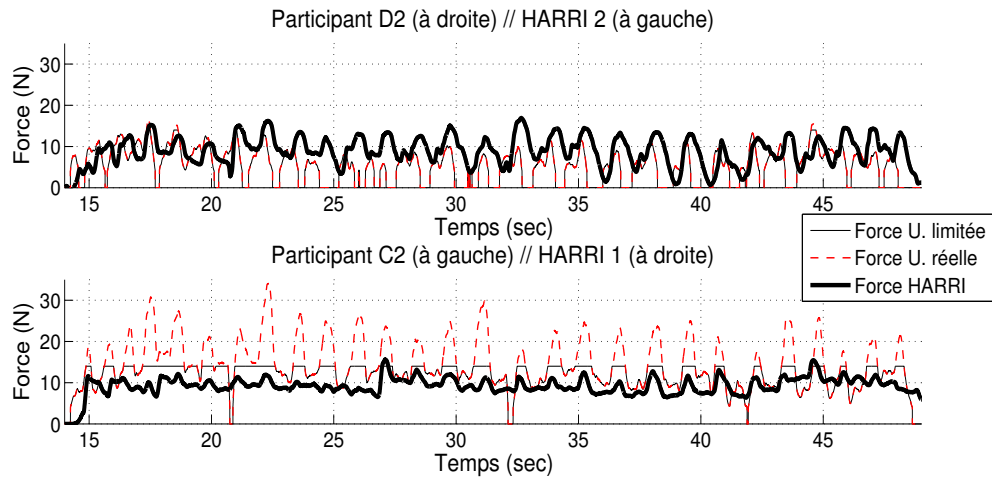
(c) Participants A2 et D2



(d) Participants B2 et C2



(e) Participants B2 et D2



(f) Participants C2 et D2

FIGURE 3.13 – Groupe 2 : Forces échangées entre les utilisateurs à travers le système de communication.

Trajectoires des deux interfaces

En second lieu, nous pouvons analyser les données relatives aux bras robotiques, lesquels jouent un rôle tout aussi important que celui des mains dans l'interaction humain-humain. Les figures 3.14 et 3.15 représentent les trajectoires des interfaces dans l'espace de travail, c'est-à-dire le plan YZ . En général, les deux interfaces haptiques sont déplacées principalement le long de l'axe vertical, bien que nous puissions observer d'autres cas où le mouvement se produit sur les deux axes (figures 3.15a, 3.15e).

Il est intéressant d'observer plus attentivement la figure 3.14 car elle montre comment la poignée de main peut être différente d'un participant à l'autre et aussi comment chaque participant peut modifier sa poignée de main en fonction de la personne avec laquelle il interagit. Prenons par exemple les participants B1 et C1. Si l'on observe les figures 3.14a, 3.14d, 3.14b nous constatons que ces personnes tendent à secouer peu le bras du Baxter, contrairement au participant D1 dont le mouvement du bras est beaucoup plus marqué. Lorsque ces trois participants interagissent, la poignée de main résultante dépend de la capacité des participants à imposer leur propre « style » de poignée de main. Nous observons alors que B1 ne change guère son style, obligeant D1 à réduire légèrement le mouvement du bras (Fig. 3.14e). En revanche, lorsque D1 interagit avec C1 (Fig. 3.14f), ce dernier s'adapte plus à l'interlocuteur et secoue davantage le bras du robot. Le participant A1 ne semble pas avoir un style particulier de poignée de main. Il se laisse guider d'abord par le participant B1 (Fig. 3.14a) et ensuite par le participant D1 (Fig. 3.14c). Lorsqu'il interagit avec le participant C1, en revanche, il essaie d'imposer son mouvement, en secouant plus que l'autre personne le bras robotique (Fig. 3.14b). Finalement nous pouvons affirmer que le participant B1, qui ne change jamais son style de poignée, peut être considéré comme étant le leader du groupe 1.

Nous pouvons faire une analyse similaire dans le groupe 2 (Fig. 3.15), bien que nous ayons noté une coordination moins importante entre ces quatre participants. Le leader de ce deuxième groupe semblerait être le participant D2, alors que les autres ne semblent pas avoir un style précis de poignée de main, du moins en ce qui concerne le mouvement du bras robotique.

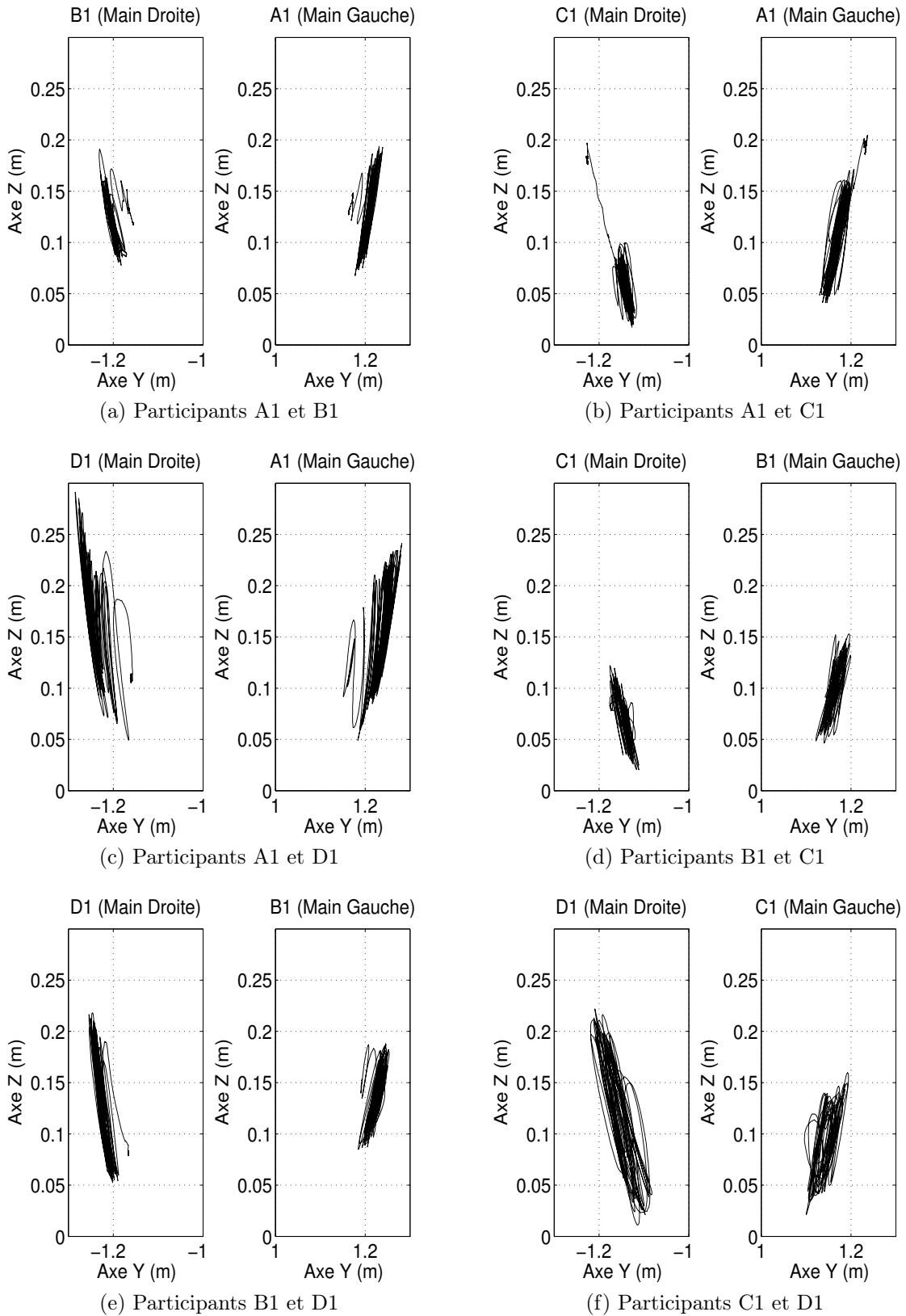


FIGURE 3.14 – Groupe 1 : Trajectoires des deux interfaces dans l'espace de travail YZ.

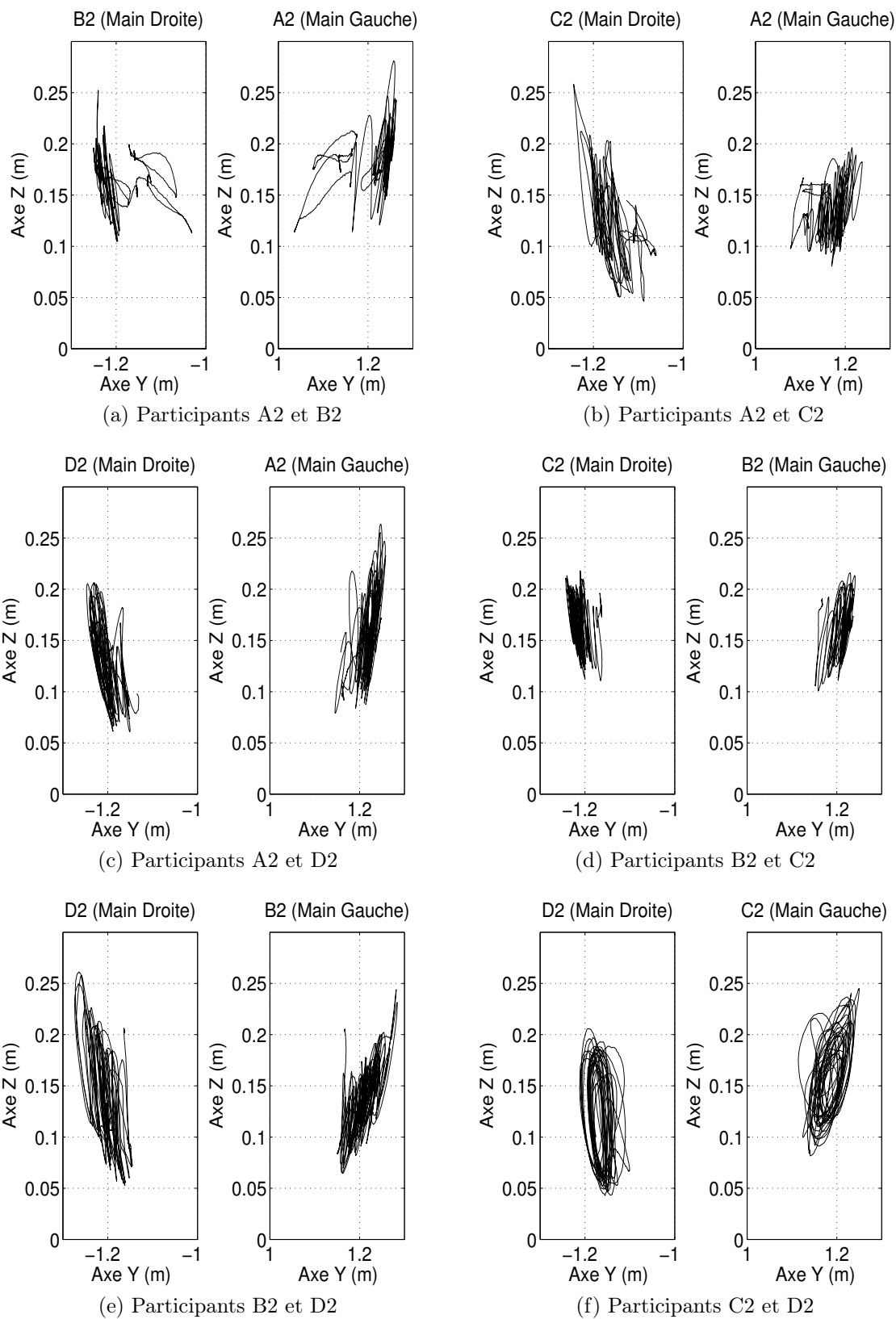


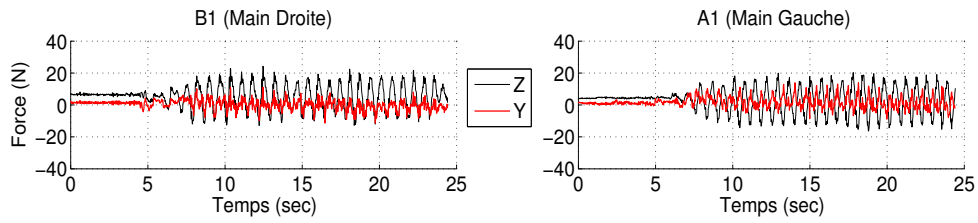
FIGURE 3.15 – Groupe 2 : Trajectoires des deux interfaces dans l'espace de travail YZ .

Forces mesurées par le robot Baxter

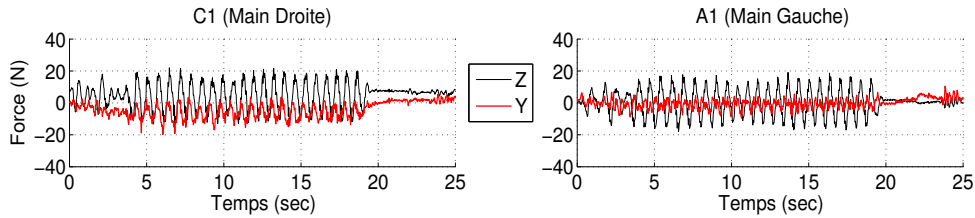
Enfin, nous pouvons analyser les forces appliquées aux effecteurs du robot Baxter par les utilisateurs lors des poignées de main. Ces forces sont mesurées par le robot Baxter lui-même et représentées graphiquement sur les figures 3.16 et 3.17. Les mouvements liés à la poignée de main ont lieu dans le plan YZ , où Y représente l'axe horizontal et Z l'axe vertical. Nous pouvons affirmer de façon générale que les forces les plus grandes sont mesurées principalement le long de l'axe vertical (figures 3.16a, 3.16b, 3.16d, 3.16e, 3.16f, 3.17b, 3.17c, 3.17d), bien que nous puissions observer d'autres cas où les forces mesurées par le robot Baxter ont le même ordre de grandeur le long des deux axes (figures 3.16c, 3.17a, 3.17e, 3.17f).

L'aspect le plus intéressant pour nous est représenté par l'amplitude maximale que les forces mesurées le long des deux axes peuvent atteindre. En effet, ces valeurs limites forment une importante base de données qui pourrait être utilisée éventuellement pour le design d'un nouveau système de support pour les deux interfaces HARRI. Ce système de support pourra remplacer le robot Baxter et constituer un système de communication pour la poignée de main à distance plus facile à reproduire et vraisemblablement moins coûteux.

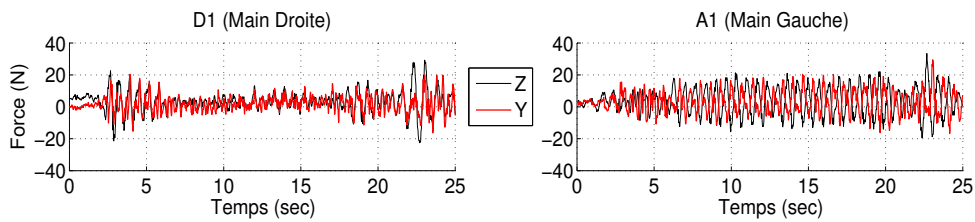
Les valeurs maximales des forces dans la direction de l'axe Y et de l'axe Z , indiquées comme étant les forces maximales dans la direction positive et comme étant les forces minimales dans la direction négative de l'axe correspondant, sont représentées au tableau 3.12. Ces valeurs ont été calculées à partir des graphes illustrés sur les figures 3.16 et 3.17, en obtenant d'abord les minimums et les maximums relatifs de chaque graphe et ensuite la valeur moyenne pour chaque participant. Les valeurs moyennes du groupe 1 et du groupe 2, ainsi que la valeur moyenne générale, sont également indiquées. Le résultat confirme qu'en général les forces les plus importantes s'enregistrent le long de l'axe vertical, bien que dans le deuxième groupe les participants tendent à secouer davantage l'interface le long de l'axe horizontal, par rapport au groupe 1.



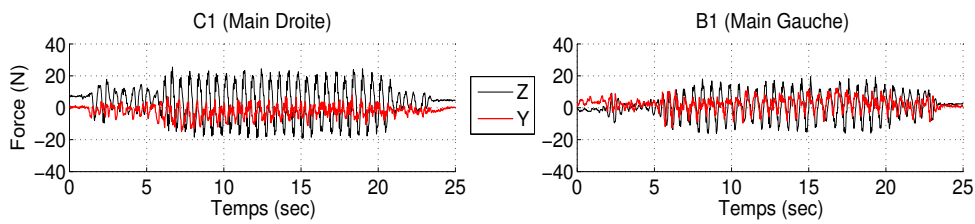
(a) Participants A1 et B1



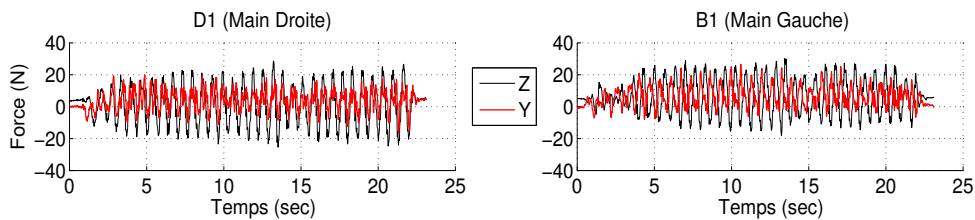
(b) Participants A1 et C1



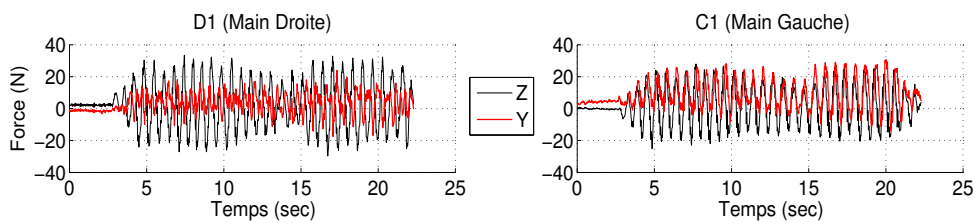
(c) Participants A1 et D1



(d) Participants B1 et C1

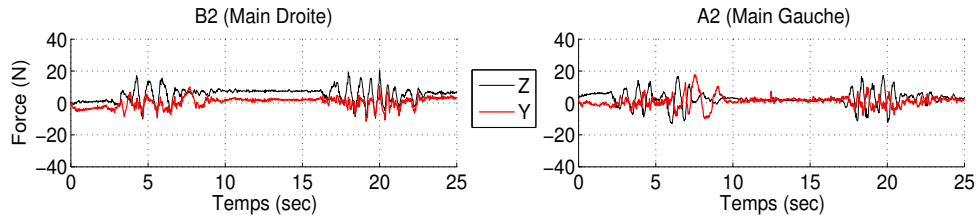


(e) Participants B1 et D1

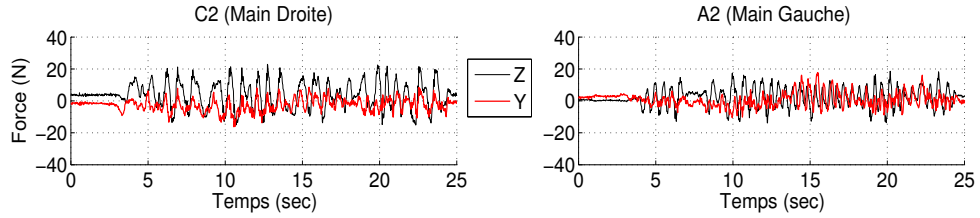


(f) Participants C1 et D1

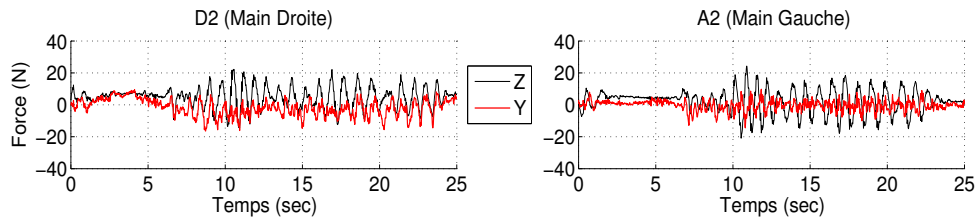
FIGURE 3.16 – Groupe 1 : Forces Baxter dans le plan YZ .



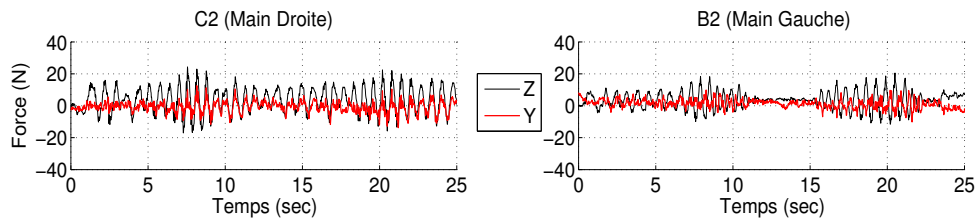
(a) Participants A2 et B2



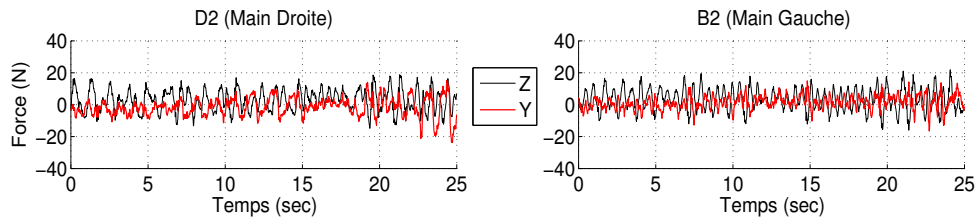
(b) Participants A2 et C2



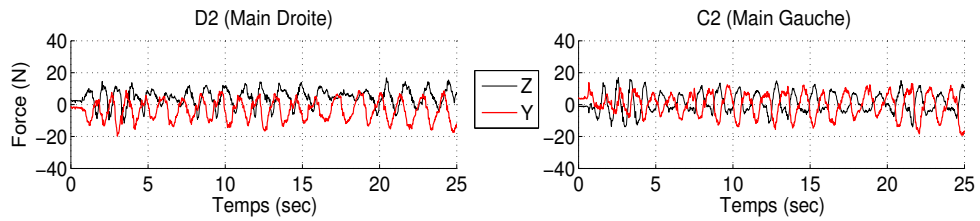
(c) Participants A2 et D2



(d) Participants B2 et C2



(e) Participants B2 et D2



(f) Participants C2 et D2

FIGURE 3.17 – Groupe 2 : Forces Baxter dans le plan YZ .

TABLE 3.12 – Forces externes mesurées par le robot Baxter sur le long de l’axe Z vertical et de l’axe Y horizontal. Toutes les valeurs sont exprimées en Newton (N).

Participant	Force Max. Z	Force Min. Z	Force Max. Y	Force Min. Y
A1	17,2517	-11,4792	7,7686	-8,8491
B1	19,1137	-13,6745	8,4543	-7,8124
C1	20,7221	-14,5687	6,5388	-10,4663
D1	21,1949	-17,0144	13,0177	-6,8314
Groupe 1	19,5706	-14,1842	8,9449	-8,4898
A2	15,7467	-8.2126	6,4749	-9,9077
B2	14,3187	-7.3720	6,7168	-10,0366
C2	15,6069	-8.1805	6,1555	-11,1916
D2	14,0889	-7,0188	6,2931	-12,5815
Groupe 2	14,9403	-7,6959	6,4101	-10,9293
Moyenne	17,2555	-10,9401	7,6775	-9,7096

Commentaires des participants

En général, les commentaires des participants suite à la séance ont été positifs, le rendu haptique aussi bien de la main que du robot Baxter ayant été évalué positivement. Tel que nous l’avons mentionné auparavant, lors d’une poignée de main équilibrée, les bras du robot Baxter suivent bien les mouvements désirés si ceux-ci ne sont pas très rapides. Le résultat est une poignée de main réaliste et intuitive.

Il est intéressant de mentionner les commentaires des personnes ayant participé également au premier test avec le robot KUKA LWR. Quelques-uns d’entre eux ont affirmé que la sensation globale de cette nouvelle expérience était meilleure, le bras et l’interface robotique étant plus raides. Cela s’explique par le fait que dans le premier test le bras robotique ne faisait qu’accompagner le déplacement de l’interface, sans s’y opposer, et que l’interface elle-même était beaucoup moins raide. D’autres ont remarqué au contraire que la réponse du KUKA LWR était plus intuitive. Le robot KUKA permettait un mouvement plus complet et réaliste incluant par exemple la rotation du poignet, que le Baxter ne fournit pas. De plus, ce dernier n’est pas capable de suivre les déplacements très rapides de la main, ce qui altère en partie la sensation ressentie.

Le robot Baxter

Le robot Baxter a été choisi pour la séance expérimentale décrite et analysée auparavant pour plusieurs raisons. En premier lieu, il a permis de concentrer notre attention uniquement sur la commande croisée des deux interfaces haptiques et sur leurs réponses lors d'une poignée de main entre deux utilisateurs. En second lieu, nous avons pu enregistrer des données importantes concernant les déplacements des interfaces dans l'espace de travail et les forces que le robot doit supporter pendant la poignée de main.

Malheureusement, le robot Baxter ne permet pas d'implémenter un système idéal de transmission de force, à cause de plusieurs facteurs. Tel que nous l'avons déjà mentionné, il est très difficile d'implémenter un comportement à miroir pour les deux bras, les modes de contrôle du robot étant limités. Il en résulte que le rendu haptique est partiellement compromis, bien que cela affecte des mouvements secondaires. Le problème principal du Baxter est cependant le manque de raideur, lequel affecte aussi bien les articulations actives que celles non utilisées dans la boucle. Afin de reproduire le mouvement désiré, nous imposons une valeur constante à la position de toutes les articulations non utilisées. Toutefois, ces articulations étant compliantes, elles continuent à bouger légèrement pendant la séance expérimentale, ce qui altère le rendu haptique. De plus, ce problème de compliance excessive concerne également les deux articulations qui sont utilisées dans la commande, c'est-à-dire l'articulation e_1 et l'articulation w_1 . Théoriquement, les deux bras devraient suivre la même trajectoire en tout temps. En réalité, la force exerçable par le robot n'étant pas très élevée, les deux personnes peuvent déplacer les deux bras dans deux directions différentes. Le robot résiste à ces forces contraires en essayant de ramener les bras à la même position mais il ne peut pas s'y opposer complètement. Si les participants ne se synchronisent pas lors de la poignée de main à distance, chacun peut essayer de suivre sa trajectoire sans que le robot ne les oblige à en suivre une seule. Ce comportement peut être observé sur les figures 3.14 et 3.15. Les trajectoires présentent certaines différences alors que théoriquement elles devraient être égales. Ce comportement peut être observé également sur la vidéo « Chapitre3_2.mp4 », laquelle présente le montage utilisé pour cette expérience et aussi une démo de la poignée de main à distance entre deux utilisateurs. Si en revanche un des participants se laisse guider par l'autre, la force du robot est suffisante pour que le participant ressente le mouvement de l'autre utilisateur, sous couvert que celui-ci ne soit pas trop rapide.

À la lumière des défauts du robot Baxter, un nouveau système robotique doit être conçu afin de le remplacer et améliorer le ressenti haptique global.

Conclusion

En conclusion, nous pouvons affirmer que le système composé de deux interfaces anthropomorphes pour la poignée de main à distance permet de reproduire à distance la forme la plus connue de salut entre les gens et ce de façon intuitive et réaliste. La commande adaptative a démontré qu'elle fonctionne bien lors de poignées de main caractérisées par une force limitée, les moteurs du dispositif HARRI ayant une puissance relativement réduite. Le robot Baxter offre un excellent banc d'essai pour l'étude des interactions humain-humain à distance mais il manque de raideur et de force. Pour cette raison, un nouveau système pour la poignée de main est présenté afin de remplacer le Baxter. Ce système possède un seul degré de liberté permettant des mouvements le long de l'axe vertical. La prochaine section présente ce mécanisme à un degré de liberté et la poignée de main réalisée en utilisant ce nouveau système de communication.

3.4.3 Mécanisme à rail pour la poignée de main à distance

Comme nous avons pu l'observer, le robot Baxter ne permet pas de reproduire des mouvements synchronisés des deux bras lors d'une poignée de main. Il en résulte un manque de transparence du système en ce qui concerne la position des interfaces. Ce comportement est dû à la compliance du robot Baxter. Afin d'améliorer la synchronisation des mouvements des deux interfaces, un nouveau mécanisme de support doit être construit.

La séance expérimentale conduite en utilisant le robot Baxter nous a tout de même fourni quelques informations très précieuses par rapport à la poignée de main entre deux personnes. En premier lieu, nous avons pu enregistrer les forces appliquées sur le robot lors de cette poignée. En second lieu, nous avons constaté que les trajectoires des bras du robot dans l'espace de travail, c'est-à-dire le plan YZ , peuvent être résumées par des mouvements verticaux.

Le mécanisme à rail vertical

Suite à cela, un mécanisme de support a été conçu afin de remplacer le robot Baxter dans le système de communication pour la poignée de main à distance. Il s'agit d'un mécanisme à rail vertical à un degré de liberté, actionné par un moteur Pittman avec un système direct-drive. L'idée est donc de remplacer un robot tel que le robot Baxter, capable de reproduire à quelques mouvements près le bras humain mais sans en garantir la raideur, par un mécanisme au contraire très simple mais permettant un système final

très raide. La figure 3.18 représente l'interface anthropomorphe HARRI montée sur le mécanisme à rail. L'interface est montée sur une plaque, attachée à une courroie, laquelle permet des mouvements verticaux avec une amplitude maximale de 30 *cm*.

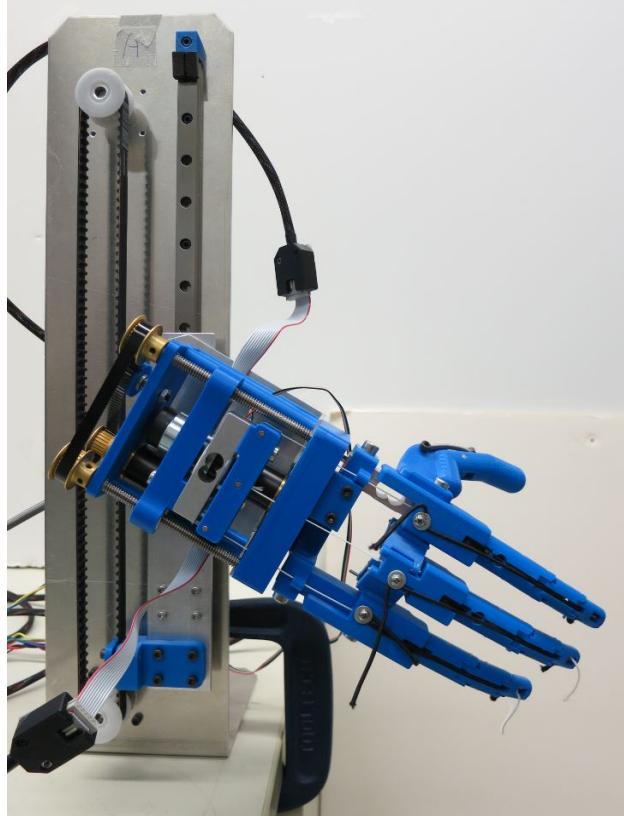


FIGURE 3.18 – Le mécanisme à rail vertical.

Commande

Le mécanisme à rail étant très simple, il peut être commandé sans employer de capteur de force. Nous pouvons donc utiliser la commande par impédance définie au chapitre 1 et utiliser les signaux des encodeurs pour faire en sorte que les deux mécanismes se trouvent à la même position à chaque instant de temps. La commande sera dès lors définie comme suit :

$$\tau_i = C(x_{d,i} - \dot{x}_i) + K(x_{d,i} - x_i) + \tau_g, \quad i = A, B \quad (3.5)$$

où les vitesses et les positions désirées sont définies telles que :

$$\begin{aligned}\dot{x}_{d,A} &= 0, \\ \dot{x}_{d,B} &= 0, \\ x_{d,A} &= x_B, \\ x_{d,B} &= x_A.\end{aligned}\tag{3.6}$$

τ_g est le terme de compensation de gravité défini comme $\tau_g = -gmr$, où g est l'accélération gravitationnelle, m le poids de l'interface anthropomorphe (environ 750 g) et r le rayon de la poulie entraînant la courroie.

Séance expérimentale

Afin d'étudier le mécanisme à rail vertical, nous demandons aux mêmes participants de la séance expérimentale avec le robot Baxter de répéter l'expérience en utilisant ce nouveau système de communication. La loi de commande pour les deux interfaces étant la même qu'auparavant, l'attention se concentre ici sur la position des interfaces. Grâce à la raideur du système, les mouvements des bras sont enfin synchronisés, tel que cela est illustré dans la prochaine section. L'effet final sur le système est impressionnant : les participants devant désormais se coordonner, chaque utilisateur ressent davantage la présence de l'autre personne. En dépit de sa simplicité, le mécanisme à rail garantit donc un meilleur ressenti final aux utilisateurs. La figure 3.19 représente la poignée de main exécutée en utilisant le nouveau système de communication.

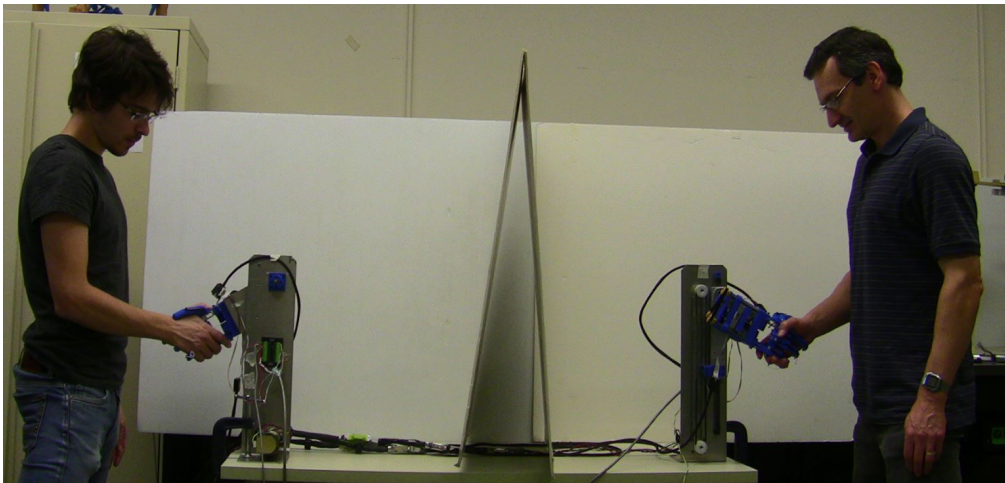


FIGURE 3.19 – Poignée de main à distance avec les mécanismes à rail vertical.

Trajectoires des deux interfaces

Comme nous l'avons vu précédemment, l'objectif principal du système composé de deux mécanismes à rail est de permettre la synchronisation des mouvements des bras lors de la poignée de main à distance. Si nous observons les positions des deux interfaces représentées sur les figures 3.20 et 3.21, nous pouvons constater que cet objectif est atteint.

Lors de l'analyse des trajectoires de la séance avec le robot Baxter, décrite à la section 3.4.2, nous avons étudié le comportement de chaque participant interagissant avec les autres. Une analyse plus détaillée a été conduite sur le groupe 1. La figure 3.20 confirme cette analyse indiquant le participant B1 comme étant le leader du groupe. En effet, la figure démontre que cette personne tend toujours à secouer peu le bras, même en interagissant avec d'autres participants, comme par exemple le participant D1, dont le mouvement du bras est en temps normal plus marqué.

En revanche, une simple observation avait été faite sur le groupe 2, en affirmant que le participant D2 semblait en être le « leader ». Une analyse de la figure 3.21 peut confirmer cette supposition. Cette figure représente les trajectoires des interfaces pour les poignées de main entre les participants du groupe 2. Nous pouvons facilement remarquer que les participants A2, B2 et C2 tiennent l'interface à une hauteur inférieure par rapport au participant D2. Il est intéressant de remarquer que ce dernier est le participant le plus grand du groupe. Si l'on observe plus attentivement les interactions entre le participant D2 et les autres personnes, nous pouvons remarquer que le premier tend à tirer vers le haut son interface au début de chaque poignée de main, afin d'amener l'interface à la hauteur qui lui convient. Le fait que ce participant impose sa propre hauteur à l'interface confirme son caractère de leader.

Le tableau 3.13 contient les hauteurs moyennes de l'interface et l'amplitude verticale du mouvement du bras de chaque utilisateur. Il est intéressant de remarquer que le participant qui déplace davantage l'interface, c'est-à-dire le participant D1, est également la personne appliquant les plus grandes forces sur le robot Baxter (Tableau 3.12).

Conclusion

En conclusion, nous avons proposé un nouveau système pour la poignée de main à distance remplaçant le robot Baxter. Ce système est composé de deux mécanismes à rail à un degré de liberté permettant des mouvements verticaux. Malgré sa simplicité, ce mécanisme garantit de bonnes performances et un ressenti haptique d'une plus grande

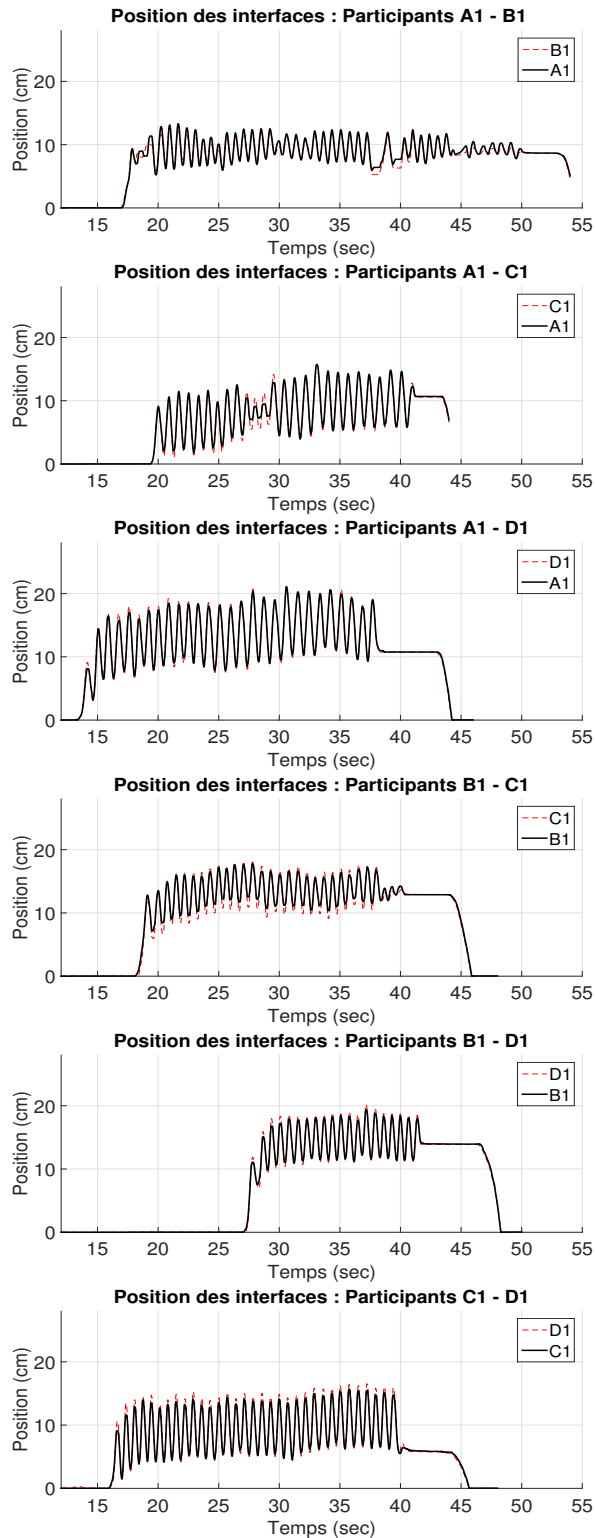


FIGURE 3.20 – Groupe 1 : Trajectoires des deux interfaces.

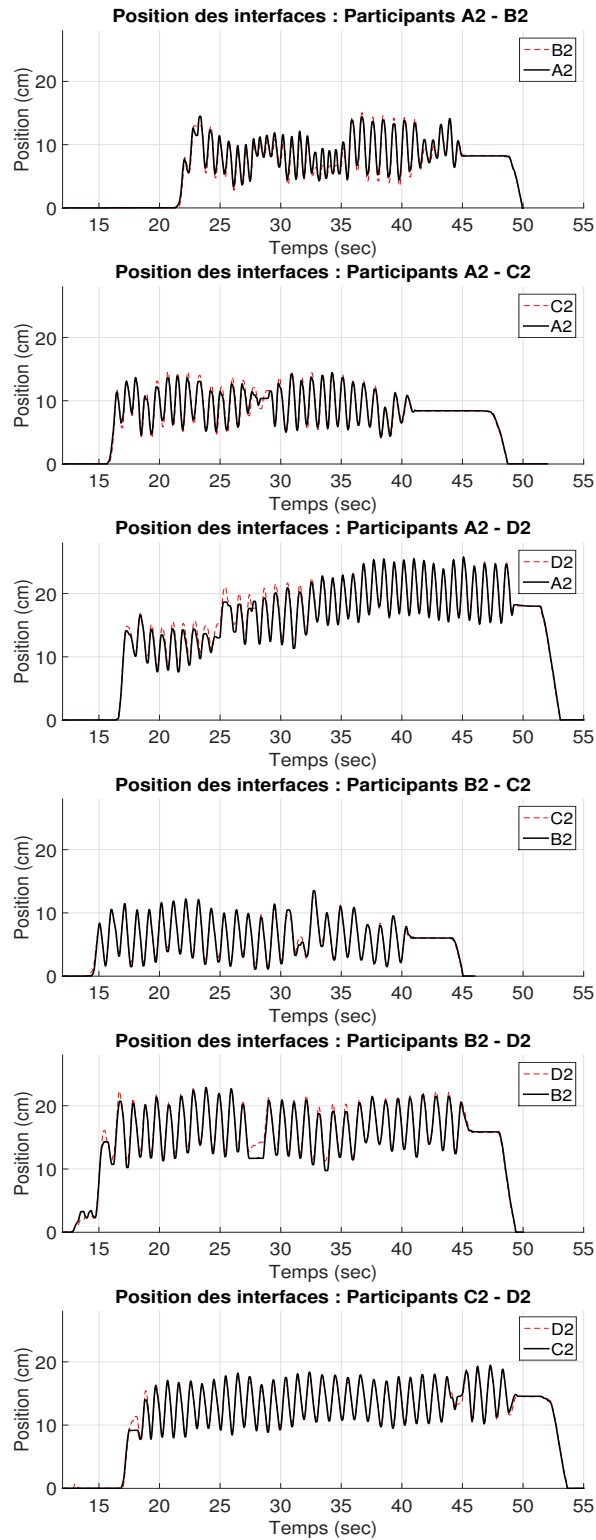


FIGURE 3.21 – Groupe 2 : Trajectoires des deux interfaces.

TABLE 3.13 – Données expérimentales de la séance avec le mécanisme à rail. Les hauteurs moyennes sont mesurées par rapport à la position initiale de l’interface. Toutes les valeurs sont en centimètres.

Participant	Hauteur Moyenne	Amplitude
A1	10.3464	7.4104
B1	12.3360	6.0218
C1	10.6254	7.4550
D1	12.4320	8.1339
A2	12.0194	6.1903
B2	10.8910	6.6794
C2	9.6354	6.9810
D2	15.5994	7.6814
Moyenne	11.7356	7.0692

qualité. La raideur des mécanismes requiert une synchronisation des mouvements des bras de la part des participants, laquelle rend l’interaction encore plus réaliste. Le système composé de deux mécanismes à rail et son comportement peuvent être également observés sur la vidéo « Chapitre3_3.mp4 », laquelle présente le montage utilisé pour cette deuxième expérience et une démo de la poignée de main à distance entre deux utilisateurs.

Le mécanisme à rail vertical à un degré de liberté pourrait être modifié dans le futur en ajoutant un degré de liberté, peut-être passif, permettant par exemple le mouvement du poignet. D’autres tests expérimentaux seront alors nécessaires afin d’étudier le système et en améliorer davantage le ressenti haptique global.

3.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre trois systèmes de télé-opération pour la communication haptique à distance. Ces trois systèmes sont composés de trois types de télé-opérateurs différents, caractérisés par un design de complexité croissante, lesquels offrent des perceptions haptiques différentes, de plus en plus réalistes et intuitives.

Le premier système de télé-opération était composé de deux mécanismes à bras de levier à un degré de liberté. Ce système avait précédemment été utilisé afin d’implémenter et d’ajuster la loi de commande par admittance. L’objectif étant de démontrer qu’un système aussi simple pouvait également être utilisé afin de transmettre un signal hap-

tique, deux tests de différente complexité ont été proposés. Le premier test consistait en l'identification d'une séquence de trois ressorts de raideur croissante à travers le système de télé-opération. Les participants furent capables d'identifier correctement la séquence avec un nombre limité d'erreurs. Un deuxième test plus compliqué fut dès lors proposé : au lieu d'identifier une séquence, nous avons demandé aux participants de distinguer quatre objets différents avec le seul retour de force fourni par le mécanisme. Ce deuxième test se révéla plus difficile. Les participants réussirent à identifier les deux objets les plus mous, mais ils confondirent souvent les deux objets les plus raides. La force exerçable par le mécanisme à bras de levier n'étant pas très élevée, les participants ne purent pas comprimer les objets les plus raides à distance et leurs retours de force s'avérèrent très similaires.

Le deuxième système de télé-opération était composé de deux mécanismes à pince à un degré de liberté. Ce dernier étant la future structure portante de l'interface anthropomorphe, ce système a été réalisé afin de valider le design du mécanisme et ses capacités de transmission de force. Le test d'identification des quatre objets a dès lors été re-proposé. Le mécanisme à pince étant plus raide, nous nous attendions à de meilleurs résultats que lors du premier test. En effet, les participants furent cette fois-ci capables de distinguer tous les objets, même les plus raides, le retour de force du mécanisme étant évidemment meilleur. Ce test nous a permis de valider le mécanisme à pince à un degré de liberté et de procéder avec le design de l'interface anthropomorphe.

Le dernier système de télé-opération était composé de deux interfaces anthropomorphes pour la poignée de main à distance (HARRI). Ce système constitue le système de télé-opération final de cette thèse, lequel permet une interaction avancée à distance entre deux personnes, en l'occurrence une poignée de main. Le dispositif HARRI ayant déjà été validé lors d'une séance expérimentale se concentrant sur l'interaction humain-robot, il s'agissait, dans ce cas, d'implémenter une interaction humain-humain. Le dispositif HARRI devint donc un moyen de communication entre les deux utilisateurs. Dans un premier temps, une loi de commande incluant deux interfaces et deux utilisateurs dans la boucle a été proposée. Nous avons par la suite présenté l'installation du nouveau système de télé-opération, pour lequel nous avons employé un robot humanoïde Baxter. Huit personnes divisées en deux groupes ont participé à la séance expérimentale. Nous avons demandé à chaque participant de serrer la main de toutes les personnes dans son groupe à travers le système de télé-opération, tel qu'ils l'auraient fait s'ils avaient été en train de serrer la main directement à l'un des autres participants. Les commentaires des personnes ayant participé à cette séance de test ont été très positifs et le système

composé par les deux interfaces fut jugé très réaliste et intuitif. Quelques remarques ont néanmoins été faites à propos du comportement du robot Baxter, ce dernier n'étant pas capable de reproduire des mouvements rapides ni de permettre un mouvement complet du poignet. Les positions et les forces du robot et des interfaces ont été illustrées et analysées, afin d'évaluer les capacités du système de façon plus rigoureuse. Finalement, un mécanisme à rail vertical à un degré de liberté a été construit afin de remplacer le robot Baxter. En dépit de sa simplicité, le système composé de deux mécanismes à rail garantit de meilleures performances. Ce système étant très raide, les mouvements des bras des participants sont désormais synchronisés et ce au profit du ressenti haptique global.

En conclusion, nous pouvons affirmer que l'interface haptique pour la poignée de main à distance, c'est-à-dire HARRI, est capable de reproduire les forces de serrage des utilisateurs à condition que celles-ci ne soient pas trop élevées. Afin d'avoir une force plus grande, un prototype en métal et des moteurs plus puissants s'avéreront nécessaires.

Chapitre 4

Coopération humain-humain dans le cadre de l'apprentissage à distance

Nous avons présenté, dans le premier chapitre de cette thèse, deux commandes en force indirecte, la commande par impédance et la commande par admittance. Cette dernière a été mise au point en utilisant la commande par impédance, afin de pouvoir être utilisée dans un second temps pour la gestion de l'interaction entre un utilisateur humain et le robot à travers des capteurs de force. Avant de passer à cette étape du travail, où le capteur de force devint indispensable afin de comprendre les intentions de l'utilisateur, la loi de commande par impédance fut employée pour contrôler un système de télé-opération bilatéral relativement simple. Ce système était composé de deux mécanismes parallèles ayant pour objectif d'offrir aux utilisateurs une plateforme pour l'apprentissage rapide de l'écriture à la main. Les mécanismes utilisés étant rétro-commandable, aucun capteur de force ne fut inclus dans la boucle de rétroaction.

Ce dernier chapitre présente ledit système de télé-opération et les mécanismes qui le composent. Bien que d'un point de vue chronologique il s'agisse d'un problème abordé au début du programme de doctorat, nous le présentons à la fin de la thèse afin de l'analyser dans un contexte séparé de celui de la poignée de main. Malgré que l'application soit différente, l'étude de ce système de télé-opération nous a permis de prendre connaissance des problèmes liés à la transmission et à la perception d'un signal haptique à distance et, en même temps, de développer une loi de commande qui a été utilisée dans les phases successives du projet.

4.1 Haptique et réadaptation

L'haptique est la technologie concernant le sens du toucher. Elle a de nombreuses applications dans la robotique, notamment en ce qui concerne la réadaptation. Les dispositifs haptiques peuvent jouer un rôle très important dans le processus d'apprentissage ou de récupération de certains mouvements, par exemple pour des patients ayant subi un AVC (accident vasculaire cérébral) [Jack et al., 2001] ou combattant la maladie de Parkinson [Krebs et al., 2001].

En général, dans la littérature, lorsqu'il s'agit d'aborder un problème de réadaptation, quel qu'en soit l'application, l'approche communément suivie est de réaliser une interaction humain-robot : le dispositif haptique est programmé afin d'interagir avec le patient et de lui apprendre la tâche désirée [Gillespie et al., 1997], [Feygin et al., 2002], [Patton and Mussa-Ivaldi, 2004]. Néanmoins, cette approche n'est pas la seule que nous pouvons suivre. L'alternative est une interaction entre deux personnes qui, dans le cadre de la réadaptation, seront un thérapeute et son patient. Nous aurons dès lors un système de

télé-opération bilatéral pour la communication à distance, où les dispositifs haptiques joueront le rôle de moyen de communication [Olsson et al., 2004], [Carignan and Olsson, 2004]. En revanche, cette interaction humain-humain peut être implémentée de deux façons différentes : la première est dite « directe » tandis que la seconde est dite « indirecte ». Nous nous concentrerons ici davantage sur l'interaction directe, sans oublier, toutefois, d'offrir un bref aperçu de l'interaction indirecte.

Nous appelons une interaction humain-humain « indirecte » une interaction où la personne jouant le rôle de maître et celle jouant le rôle d'élève ne travaillent pas en même temps, c'est-à-dire que cette collaboration n'a pas lieu en temps réel. Dans cette approche, il n'y a souvent qu'un seul dispositif haptique, qui est utilisé d'abord par le maître et dans un second temps par l'élève. Les mouvements du maître sont mémorisés par le dispositif, qui les reproduit en faveur de l'élève. Il s'agit de la stratégie appelée « record and replay » en anglais [Yokokohji et al., 1996]. Cette stratégie présente toutefois quelques problèmes. À titre d'exemple, il faut décider au préalable quelles données mémoriser sur le dispositif et comment les sauvegarder. En conséquence, ce ne sera pas le mouvement complet à être reproduit, mais bien une simplification de celui-ci.

Une interaction humain-humain de type direct a lieu au contraire lorsque les deux utilisateurs travaillent ensemble, chacun avec son appareil haptique. Les deux dispositifs forment dès lors un système de télé-opération contrôlé par une loi de commande proprement définie [Takemura and Kishino, 1992]. Les mouvements du maître ne sont plus mémorisés par le mécanisme mais ils sont passés directement à la personne qui se trouve de l'autre côté du système de télé-opération, c'est-à-dire l'élève, qui est donc guidé en temps réel. De plus, si le système est bilatéral, le maître peut aussi percevoir le comportement de son élève et le corriger dans le cas d'un mouvement incorrect.

Une variante plus complexe d'interaction directe a été présentée récemment : il s'agit d'une architecture de contrôle à deux utilisateurs (dénommée *dual – user teleoperation control architecture* en anglais) développée comme plate-forme d'apprentissage où l'utilisateur jouant le rôle de maître peut affecter les mouvements de l'élève et où la tâche est exécutée dans un environnement partagé [Nudehi et al., 2005], [Khademian and Hashtrudi-Zaad, 2007], [Khademian and Hashtrudi-Zaad, 2008], [Katsura and Ohnishi, 2006].

Dans ce chapitre nous présenterons un système de télé-opération bilatéral offrant une interaction directe entre deux personnes pour l'apprentissage à distance de l'écriture à la main. Cette thèse est insérée dans le cadre de la communication haptique à dis-

tance, pour laquelle l'approche la plus pertinente et la plus intéressante est l'interaction humain-humain directe. Néanmoins, la cohérence avec le projet principal n'est pas la seule raison pour laquelle nous avons décidé de suivre cette stratégie implémentant notre système. Dans la littérature, bien que les recherches proposant une approche similaire soient peu nombreuses, nous trouvons quelques exemples intéressants prouvant l'importance d'une coopération humain-humain dans l'accomplissement d'une tâche. [Sallnas and Zhai, 2003] démontrent que le taux d'erreur baisse significativement lorsqu'un feedback en force est introduit entre deux personnes travaillant ensemble. Reed et al. [2006] affirment que deux personnes qui coopèrent en exécutant une tâche physique adoptent rapidement une stratégie claire : les participants créent une sorte de « spécialisation temporelle » pour chacun d'entre eux, de sorte que tout participant contrôle une part précise et bien définie du mouvement. Cette négociation et la relative division de la tâche qui en découle ont lieu à travers une voie de communication haptique se trouvant, vraisemblablement, en dessous du niveau de conscience des participants. Ce résultat ne peut pas être observé lors d'une interaction avec un robot, et ce même si le robot est programmé pour exécuter l'un des rôles temporels assumés typiquement par l'un des participants [Reed et al., 2007]. Cette subtile communication entre deux ou plusieurs personnes n'est donc pas facile à reproduire par un robot, qui peut bien transmettre les informations entre deux humains mais qui peut difficilement en remplacer un sans que l'autre ne s'en aperçoive [Reed and Peshkin, 2008].

4.1.1 Haptique et apprentissage assisté de l'écriture : un aperçu

Tel que nous l'avons déjà mentionné, l'application du système de télé-opération que nous présenterons dans ce chapitre est l'apprentissage de l'écriture. L'apprentissage pour les personnes ayant des difficultés ou le réapprentissage pour celles ayant subi un accident cérébral est un problème de grand intérêt dans le milieu de la robotique. Dans la dernière décennie, plusieurs chercheurs ont présenté des outils ou des applications haptiques dont l'objectif est d'offrir un support technologique aux personnes désirant (ré)-apprendre à écrire correctement. L'utilisation de cette technologie est bien motivée : il a été prouvé qu'un retour d'information haptique améliore les performances de l'élève en ce qui concerne l'écriture à la main [Bara and Gentaz, 2011], cela étant également vrai dans d'autres applications [Morris et al., 2007], [Gerovichev et al., 2002].

Dans la plupart des cas, l'approche choisie pour atteindre l'objectif final est une interaction humain-robot consistant à programmer hors-ligne le dispositif haptique, utilisé

dans un second temps par le patient [Kim et al., 2009], [Hennion et al., 2005], [Basteris et al., 2012], [Choi and Lo, 2011], [Lüttgen and Heuer, 2012]. En revanche, nous pouvons également trouver quelques exemples d'interaction humain-humain employée pour l'enseignement des techniques d'écriture [Yoshikawa and Henmi, 2000], [Park et al., 2010]. Souvent, lorsqu'il s'agit d'analyser le rendu du dispositif haptique, les chercheurs proposent des tâches permettant d'évaluer efficacement les élèves pendant la séance d'apprentissage, tel qu'écrire certains caractères asiatiques. Ce genre de tâche a été présentée autant pour des cas d'interaction humain-robot [Wang et al., 2006], [Solis et al., 2007] que d'interaction humain-humain indirecte [Srimathveeravalli and Thenkurussi, 2005], [Teo et al., 2002].

L'approche proposée dans ce chapitre est différente. En premier lieu, nous n'utiliserons pas ladite interaction humain-humain indirecte, où l'enseignant met à disposition de l'élève ses habilités qui ne sont transmises que dans un second temps à l'élève-même. La stratégie suivie ici est une interaction humain-humain directe, où l'enseignant et l'élève travaillent ensemble à travers le système de télé-opération. Le rôle de l'enseignant redevient donc fondamental pour la bonne réussite de l'apprentissage. Ses mouvements ne sont pas programmés hors-ligne ni simplifiés suite à la sauvegarde sur le dispositif haptique. De plus, le système étant bilatéral, c'est-à-dire les deux utilisateurs recevant un retour haptique, l'enseignant peut s'apercevoir tout de suite des éventuelles erreurs de son élève, lequel peut dès lors être aidé et corrigé en temps réel.

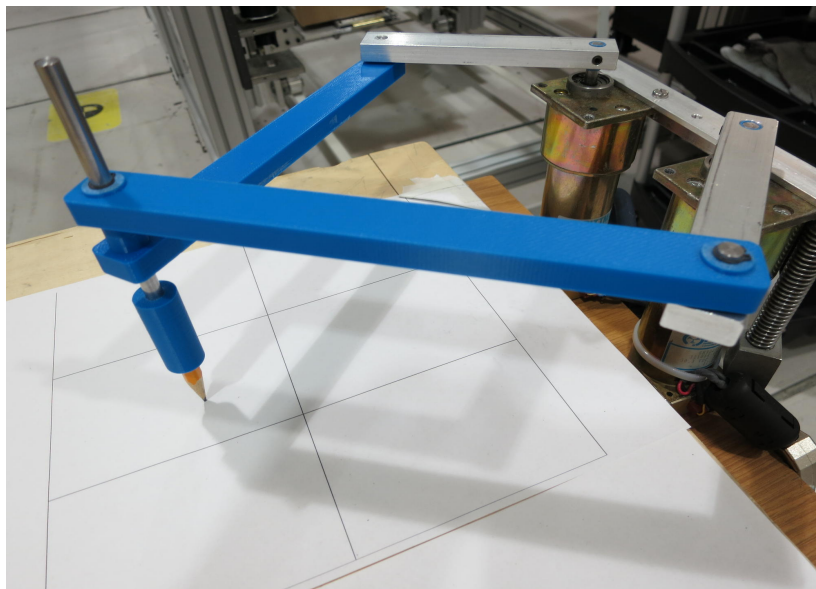


FIGURE 4.1 – Le mécanisme parallèle à cinq barres et à deux degrés de liberté.

Afin d'implémenter cette approche, nous avons conçu un dispositif haptique très simple :

il s'agit d'un robot parallèle [Merlet, 2001], notamment un mécanisme à cinq barres et deux degrés de liberté, tel qu'illustré sur la figure 4.1, contrôlé par la loi par impédance présentée au chapitre 1. Nous avons attaché un crayon à l'extrémité du mécanisme, afin de pouvoir accomplir la tâche d'écriture. Un appareil similaire avait été présenté par Frisoli et al. [1999]. Deux de ces mécanismes parallèles forment le système de téléopération bilatéral : le mécanisme A , utilisé par l'enseignant, et le mécanisme B , utilisé par l'élève.

Le chapitre est structuré comme suit. Dans un premier temps, nous présenterons le mécanisme parallèle à utiliser dans le système de téléopération en démontrant son analyse cinématique. Dans un second temps, la loi de commande par impédance, adaptée à cette application, sera illustrée. L'attention se portera finalement sur la séance expérimentale, pendant laquelle nous étudierons l'efficacité de la méthode d'apprentissage proposée : un test sera présenté et les résultats seront analysés en détail. Enfin, en conclusion, nous présenterons un test à blanc, dont l'objectif sera de prouver que les changements observés suite au premier test se sont effectivement produits grâce à l'interaction avec l'enseignant.

4.2 Cinématique du mécanisme parallèle

Le dispositif haptique que nous présentons ici est un mécanisme parallèle à cinq barres et deux degrés de liberté, tel que montré à la figure 4.1. En ce qui concerne ce mécanisme, représenté schématiquement sur la figure 4.2, les deux positions des servomoteurs par rapport au repère fixe sont décrites par les vecteurs \mathbf{n}_1 et \mathbf{n}_2 . Les variables θ_1 et θ_2 représentent les angles entre les vecteurs \mathbf{n}_i et \mathbf{u}_i (défini le long des liens proximaux) et décrivent l'orientation des deux barres proximales par rapport à la base. Deux barres distales, plus longues, sont attachées l'une à l'autre et chacune est liée passivement à la barre proximale respective. Le point d'attache de ces barres distales, là où le crayon est attaché, représente l'effecteur du mécanisme.

4.2.1 Équations de position

Les équations de position pour le mécanisme peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{aligned}\mathbf{p} &= \mathbf{n}_1 + \mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{p} &= \mathbf{n}_2 + \mathbf{u}_2 + \mathbf{v}_2\end{aligned}\tag{4.1}$$

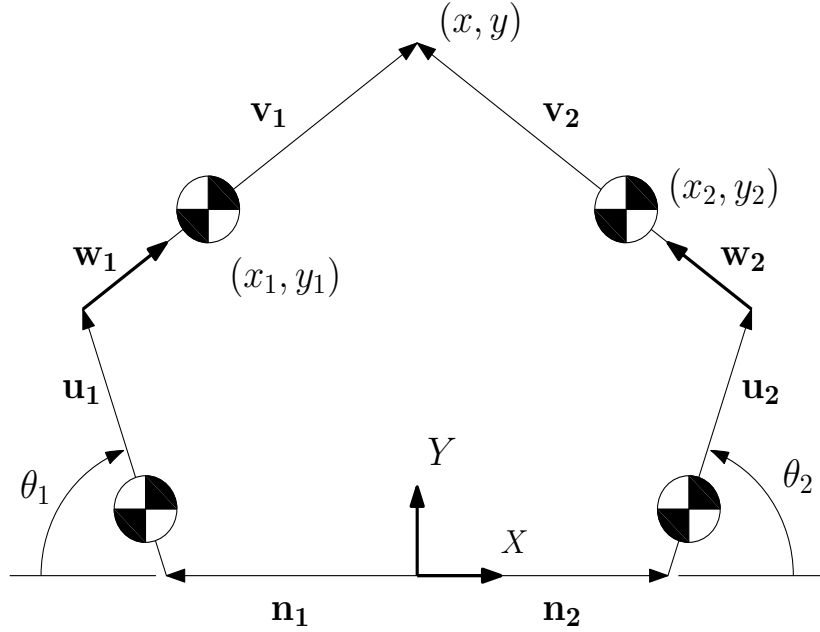


FIGURE 4.2 – Représentation schématique du mécanisme parallèle à cinq barres.

où $\mathbf{p} = [x \ y]^T$, $\mathbf{u}_1 = [-L_1 \cos \theta_1 \ L_1 \sin \theta_1]^T$, $\mathbf{u}_2 = [L_1 \cos \theta_2 \ L_1 \sin \theta_2]^T$, $\mathbf{n}_1 = [-n \ 0]^T$, $\mathbf{n}_2 = [n \ 0]^T$, $\mathbf{v}_1 = L_2 \mathbf{w}_1$ et $\mathbf{v}_2 = L_2 \mathbf{w}_2$. \mathbf{w}_1 et \mathbf{w}_2 sont les vecteurs unitaires définis le long des liens distaux. Les valeurs constantes l_1 et l_2 représentent respectivement la distance entre l'axe du moteur et le centre de masse de m_1 et la distance entre l'articulation du coude et le centre de masse de m_2 . À partir de l'équation (4.1), on peut résoudre le problème géométrique inverse, tel que cela sera démontré par la suite. L'équation (4.1) est réécrite telle que

$$\begin{aligned} \mathbf{p} - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1 &= \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{p} - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2 &= \mathbf{v}_2. \end{aligned} \quad (4.2)$$

En prenant le module de chaque membre des équations, on obtient alors

$$\begin{aligned} (\mathbf{p} - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T (\mathbf{p} - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1) &= L_2^2 \\ (\mathbf{p} - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2)^T (\mathbf{p} - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2) &= L_2^2. \end{aligned} \quad (4.3)$$

En développant les équations 4.3, nous obtenons :

$$\begin{aligned} (\mathbf{p} - \mathbf{n}_1)^T (\mathbf{p} - \mathbf{n}_1) + L_1^2 - L_2^2 &= 2(\mathbf{p} - \mathbf{n}_1)^T \mathbf{u}_1 \\ (\mathbf{p} - \mathbf{n}_2)^T (\mathbf{p} - \mathbf{n}_2) + L_1^2 - L_2^2 &= 2(\mathbf{p} - \mathbf{n}_2)^T \mathbf{u}_2. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Le problème géométrique inverse admet globalement quatre solutions. À titre d'exemple, afin d'obtenir θ_1 , nous pouvons exprimer la première ligne de l'éq.(4.4) comme suit :

$$\Lambda \cos \theta_1 + \Theta \sin \theta_1 + \Gamma = 0 \quad (4.5)$$

avec

$$\begin{aligned}\Lambda &= 2(\mathbf{p} - \mathbf{n}_1)^T \mathbf{e}_1 L_1 \\ \Theta &= 2(\mathbf{p} - \mathbf{n}_1)^T \mathbf{e}_2 L_1 \\ \Gamma &= (\mathbf{p} - \mathbf{n}_1)^T (\mathbf{p} - \mathbf{n}_1) + L_1^2 - L_2^2\end{aligned}\tag{4.6}$$

et $\mathbf{e}_1 = [1 \ 0]^T$, $\mathbf{e}_2 = [0 \ 1]^T$. Il est alors aisé de trouver les deux solutions pour θ_1 en résolvant l'éq. (4.5). Des expressions équivalentes sont facilement obtenues pour θ_2 .

Nous allons maintenant calculer explicitement la solution du problème géométrique direct, cette solution étant nécessaire pour la loi de commande que nous implémenterons dans la suite du chapitre. À partir de l'équation (4.1), nous pouvons écrire :

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{n}_1 + \mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_1 - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2 = \mathbf{s} + \mathbf{v}_1\tag{4.7}$$

où $\mathbf{s} = \mathbf{n}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{n}_2$.

En définissant α l'angle entre le vecteur unitaire \mathbf{w}_1 et l'axe horizontal, le vecteur \mathbf{v}_1 devient $\mathbf{v}_1 = [L_2 \sin \alpha \ L_2 \cos \alpha]^T$. À partir de l'éq.(4.7), nous pouvons écrire :

$$L_2^2 = (\mathbf{s} + \mathbf{v}_1)^T (\mathbf{s} + \mathbf{v}_1)\tag{4.8}$$

$$L_2^2 = \mathbf{s}^T \mathbf{s} + L_2^2 + 2\mathbf{s}^T \mathbf{v}_1\tag{4.9}$$

ce qui peut être exprimé tel que :

$$\Delta \cos \alpha + \Sigma \sin \alpha + \Phi = 0\tag{4.10}$$

avec

$$\begin{aligned}\Delta &= 2\mathbf{s}^T \mathbf{e}_1 L_2 = 2((\mathbf{n}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2))^T \mathbf{e}_1 L_2 \\ \Sigma &= 2\mathbf{s}^T \mathbf{e}_2 L_2 = 2((\mathbf{n}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2))^T \mathbf{e}_2 L_2 \\ \Phi &= \mathbf{s}^T \mathbf{s} = (\mathbf{n}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2)^T (\mathbf{n}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2).\end{aligned}\tag{4.11}$$

L'équation (4.10) possède deux solutions pour α correspondant aux assemblages possibles du mécanisme. En effet, à chaque valeur d' α , correspond une seule solution du problème géométrique direct, c'est-à-dire un seul vecteur \mathbf{p} .

4.2.2 Matrices Jacobiennes

Considérons maintenant les matrices jacobiennes du mécanisme à cinq barres. Pour un robot parallèle, l'équation suivante est valide :

$$\mathbf{K}\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{p}}\tag{4.12}$$

qui peut aussi s'écrire

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}^{-1}\mathbf{K}\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{W}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (4.13)$$

avec

$$\mathbf{W} = \mathbf{J}^{-1}\mathbf{K} \quad (4.14)$$

où \mathbf{J} et \mathbf{K} sont deux matrices jacobiennes qui peuvent être utilisées afin d'obtenir la matrice jacobienne généralisée \mathbf{W} et où $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ et $\dot{\mathbf{p}}$ désignent respectivement le vecteur des vitesses articulaires et le vecteur des vitesses cartésiennes à l'effecteur, c'est-à-dire ici $\dot{\boldsymbol{\theta}} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T$ et $\dot{\mathbf{p}} = [\dot{x}, \dot{y}]^T$. Afin de calculer les matrices jacobiennes, considérons la dérivée temporelle de l'équation (4.3) :

$$\begin{aligned} (\mathbf{p} - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T(\dot{\mathbf{p}} - \dot{\mathbf{u}}_1) &= 0 \\ (\mathbf{p} - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2)^T(\dot{\mathbf{p}} - \dot{\mathbf{u}}_2) &= 0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

ce qui peut être écrit :

$$\begin{aligned} (\mathbf{p} - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T\dot{\mathbf{p}} &= (\mathbf{p} - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T\dot{\mathbf{u}}_1 \\ (\mathbf{p} - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2)^T\dot{\mathbf{p}} &= (\mathbf{p} - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2)^T\dot{\mathbf{u}}_2. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Puisque $\dot{\mathbf{u}}_i = \dot{\theta}_i\mathbf{E}\mathbf{u}_i$, avec $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, l'équation (4.16) peut être écrite telle que :

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{K}\dot{\boldsymbol{\theta}}, \quad (4.17)$$

avec

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} (\mathbf{p} - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T \\ (\mathbf{p} - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2)^T \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} (\mathbf{p} - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T\mathbf{E}\mathbf{u}_1 & 0 \\ 0 & (\mathbf{p} - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2)^T\mathbf{E}\mathbf{u}_2 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

et la matrice \mathbf{W} peut être calculée en utilisant l'équation (4.14).

Dans la prochaine section, dédiée à la loi de commande, nous discuterons, entre autres, du terme de compensation de gravité du mécanisme, pour lequel il faut calculer également les matrices \mathbf{W}_1 et \mathbf{W}_2 . Le terme de gravité n'étant pas utilisé dans la commande finale, tel que cela sera expliqué au cours de la prochaine section, le calcul explicite de \mathbf{W}_1 et \mathbf{W}_2 est reporté à l'annexe B.

4.3 Loi de commande par impédance

Le contrôleur dont nous avons besoin pour cette application est un contrôleur en position. Nous utilisons dès lors le contrôleur par impédance présenté au chapitre 1, lequel garantit de bonnes performances et une bonne stabilité au système. L'objectif de la commande est de faire bouger le dispositif haptique A à l'unisson avec le dispositif B et vice-versa, c'est-à-dire que les mouvements du premier mécanisme correspondent à ceux du second. À titre d'exemple, si une personne saisit le dispositif A et le déplace, le dispositif B bougera suivant la même trajectoire, en absence d'autre force externe. Si, au contraire, un deuxième utilisateur saisit le dispositif B , il ressentira le mouvement imprimé par le premier utilisateur et il pourra décider d'accompagner ce mouvement ou de s'y opposer. Dans les deux cas, les deux utilisateurs auront établi une communication à distance.

La loi de commande générale peut être écrite comme suit :

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}_i, \dot{\boldsymbol{\theta}}_i) + \mathbf{W}^T [C_1(\ddot{\mathbf{p}}_{0,i} - \ddot{\mathbf{p}}_i) + C_2(\dot{\mathbf{p}}_{0,i} - \dot{\mathbf{p}}_i) + C_3(\mathbf{p}_{0,i} - \mathbf{p}_i)] \quad (4.20)$$

où $\boldsymbol{\tau}_i = [\tau_{i,1} \ \tau_{i,2}]^T$ est le vecteur des couples appliqués aux servomoteurs 1 et 2 du mécanisme du côté i , avec $i = A, B$. Les vecteurs $\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i]^T$, $\dot{\mathbf{p}}_i = [\dot{x}_i \ \dot{y}_i]^T$ et $\ddot{\mathbf{p}}_i = [\ddot{x}_i \ \ddot{y}_i]^T$ sont respectivement les vecteurs de position, de vitesse et d'accélération de l'effecteur i , tandis que $\mathbf{p}_{0,i} = [x_{0,i} \ y_{0,i}]^T$, $\dot{\mathbf{p}}_{0,i} = [\dot{x}_{0,i} \ \dot{y}_{0,i}]^T$, $\ddot{\mathbf{p}}_{0,i} = [\ddot{x}_{0,i} \ \ddot{y}_{0,i}]^T$ représentent les vecteurs de position désirée, de vitesse désirée et d'accélération désirée de l'effecteur i . Dans cette application, leurs valeurs seront :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{p}}_{0,i} &= \ddot{\mathbf{p}}_{0,i} = \mathbf{0} \\ \mathbf{p}_{0,a} &= \mathbf{p}_b \\ \mathbf{p}_{0,b} &= \mathbf{p}_a \end{aligned} \quad (4.21)$$

avec $i = A, B$. Les coefficients C_1 , C_2 et C_3 sont des valeurs scalaires ajustées de façon expérimentale, tel que cela a été démontré dans la section 1.2.2 du chapitre 1. \mathbf{W} est la matrice jacobienne du mécanisme, qui a été calculée à la section 4.2.2.

Le terme $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}_i, \dot{\boldsymbol{\theta}}_i)$ contenant les effets de Coriolis, des forces centrifuges, les frictions et la force de gravité peut être simplifié. Le mécanisme parallèle étant utilisé pour la plupart du temps avec des vitesses et des accélérations limitées, on peut négliger les effets dynamiques de $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}_i, \dot{\boldsymbol{\theta}}_i)$. De plus, le dispositif étant censé travailler sur le plan horizontal, nous pouvons nous passer du terme de gravité. Ce dernier est calculé à l'annexe B. Il faut également remarquer que les signaux d'accélération sont souvent très

bruités et que cela affecte négativement les performances, tel que nous l'avons vérifié expérimentalement. Pour cette raison, on n'inclut pas de signaux d'accélération dans la boucle. La loi de commande simplifiée peut être écrite ainsi :

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{W}^T [C_2(\dot{\mathbf{p}}_{0,i} - \dot{\mathbf{p}}_i) + C_3(\mathbf{p}_{0,i} - \mathbf{p}_i)]. \quad (4.22)$$

Le servomoteur employé ici, le Pittman GM9X36, possède un réducteur de 5,9 : 1. La conséquence principale est l'existence d'un terme de friction, qui affecte le comportement de l'appareil. Une autre modification est donc apportée au contrôleur, soit :

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{W}^T [C_2(\dot{\mathbf{p}}_{0,i} - \dot{\mathbf{p}}_i) + C_3(\mathbf{p}_{0,i} - \mathbf{p}_i)] - \mathbf{F} \quad (4.23)$$

où \mathbf{F} est un vecteur d'approximation du terme de friction défini tel que :

$$\mathbf{F} = [f_1 \text{sign}(\dot{\theta}_{i1}) \quad f_2 \text{sign}(\dot{\theta}_{i2})]^T \quad (4.24)$$

où *sign* représente la fonction signe et f_i est le module du terme de friction lié au moteur i .

La loi de commande finale dans sa forme définitive est donc celle donnée à l'éq. (4.23).

4.4 Première séance expérimentale : apprentissage via rétroaction haptique

Dans les paragraphes précédents, nous avons étudié la cinématique du mécanisme parallèle et développé une loi de commande pour l'application d'assistance à l'écriture. Ce mécanisme pourrait être programmé hors ligne pour lui faire suivre des trajectoires désirées, mais le résultat le plus intéressant est obtenu en créant un système de téléopération bilatéral composé de deux dispositifs. Dans ce cas, l'enseignant joue un rôle fondamental pour la réussite de la séance d'apprentissage.

Ce dispositif est intuitif et très simple à utiliser, même par des gens ne travaillant pas dans le domaine de la robotique. Le montage expérimental utilisé est illustré sur la figure 4.3 et également sur la vidéo « Chapitre4.mp4 ». Sur la figure 4.3(a), la personne jouant le rôle d'enseignant (à gauche) est gaucher tandis que celle représentant l'élève (à droite) est droitier. Contrairement à d'autres travaux où les participants apprenaient quelque chose de nouveau, tel que des caractères asiatiques [Solis et al., 2007], [Wang et al., 2006], [Srimathveeravalli and Thenkurussi, 2005], [Teo et al., 2002], la tâche proposée ici est d'écrire un mot connu, notamment *hello*, en utilisant le mécanisme

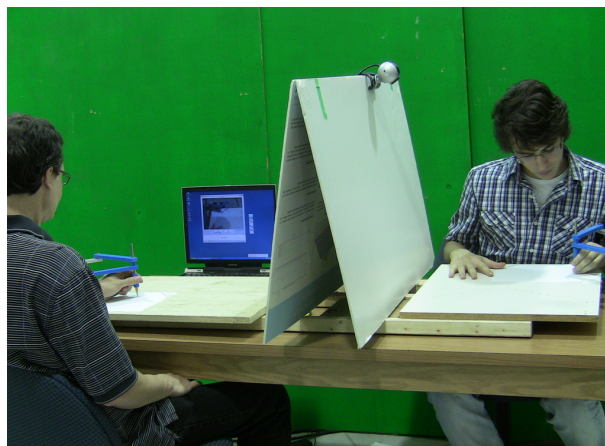
parallèle avec la main non-dominante, c'est-à-dire la main gauche pour les participants droitiers et la main droite pour les participants gauchers.

Tel que nous l'avons déjà mentionné, le mécanisme parallèle à cinq barres est un outil permettant d'apprendre ou bien d'améliorer notre écriture. Idéalement, cela pourrait s'adresser aux enfants avec des difficultés d'apprentissage ainsi qu'aux adultes ayant subi un accident. L'utilisation de la main non-dominante vise surtout le deuxième cas : le participant connaît déjà, de façon théorique, comment accomplir la tâche, mais dans un certain sens il doit la réapprendre avec l'autre main.

4.4.1 Le test

Huit personnes, dont certaines sans aucune notion de robotique, participent au test. Celui-ci consiste en six essais. Au premier essai nous demandons à la personne d'écrire le mot *hello* en utilisant le dispositif haptique *B* avec la main non-dominante et en suivant une trajectoire prédéterminée. L'assistance de l'enseignant commence au deuxième essai et continue jusqu'au cinquième. Pendant ces essais, le participant, c'est-à-dire l'élève, est effectivement aidé par l'enseignant à accomplir la tâche d'écriture. L'enseignant, en contrôlant le dispositif haptique *A*, est capable de guider son élève le long de la trajectoire, tout en pouvant le corriger en temps réel si cela s'avère nécessaire. Il est important de noter que l'enseignant utilise le dispositif avec sa main dominante, celle dont il se sert d'habitude pour écrire. Lors du sixième et dernier essai, le participant exécute la tâche sans assistance externe. Nous nous demandons si entre le premier et le dernier essai, c'est-à-dire ceux sans assistance, une différence appréciable existe et, le cas échéant, si celle-ci peut être mesurée. Une analyse qualitative d'abord et une analyse quantitative ensuite sont dès lors menées afin de répondre à ces questions, tel que cela sera démontré dans la suite du chapitre.

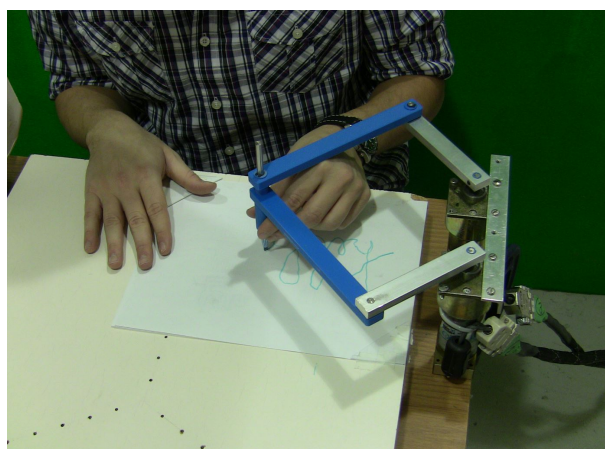
Avant de passer aux résultats du test, quelques commentaires sont cependant nécessaires. Nous simulons ici un apprentissage à distance : l'enseignant et son élève ne communiquent qu'à travers le système de télé-opération. Autrement dit, le signal haptique est la seule information transmise entre les deux utilisateurs du système, qui idéalement pourraient se trouver dans deux endroits différents. Afin de mieux simuler cette condition d'éloignement, un panneau sépare les deux utilisateurs au cours de la séance expérimentale. L'élève ne peut donc voir son enseignant et il doit se concentrer sur la perception haptique fournie par le dispositif. En revanche, une caméra est installée au-dessus de l'espace de travail de l'élève afin que l'enseignant puisse en observer



(a) Le maître (à gauche) avec son élève (à droite)



(b) L'espace de travail de l'élève



(c) Détail de l'espace de travail de l'élève

FIGURE 4.3 – Le dispositif expérimental.

le progrès au cours de la séance. Il est également important de noter que l'enseignant reste la même personne pendant toute la séance expérimentale.

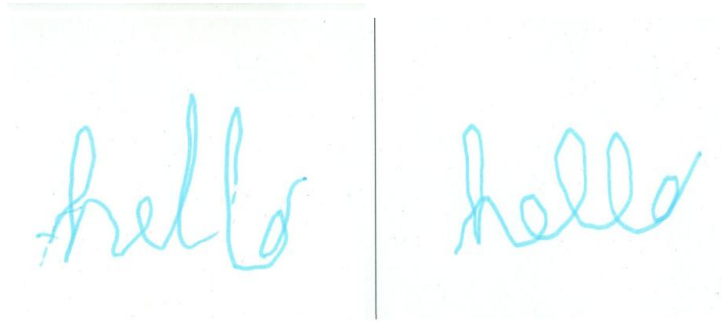
4.4.2 Observation qualitative du résultat

Malgré le nombre réduit d'essais, le résultat final du test est très intéressant. Une première analyse qualitative peut être faite en observant et en comparant les *hello* écrits par les participants lors du premier et du dernier essai (Fig. 4.5). Tel que cela peut être observé sur la figure, le style d'écriture de ceux-ci semble subir un changement pendant la séance d'apprentissage, lequel pourrait être dû à l'influence de l'enseignant. Chaque participant a son propre style d'écriture, cependant nous pouvons remarquer que les mots écrits à la fin de la séance d'apprentissage se ressemblent. Considérons par exemple la lettre *L*. Au dernier essai, tous les participants écrivent cette lettre plus arrondie qu'au début. De plus, le point d'intersection de la courbe formant la lettre *L* paraît changer. Sur la figure 4.6, nous définissons l_3 et l_6 cette distance pour les deux lettres *L* : en général, ces distances sont plus courtes à la fin de la séance qu'au début. Ces deux caractéristiques sont typiques du style d'écriture de l'enseignant et cette influence peut être déduite, en proportions différentes, pour tous les élèves. En résumé, il semble que les élèves aient appris à accomplir la tâche telle que leur enseignant l'exécutait. Il est important de souligner également que cette influence a eu lieu malgré le nombre limité d'essais expérimentaux. Ces considérations sont purement qualitatives et motivées par la simple observation des résultats. Dans la prochaine section, une analyse plus approfondie sera conduite afin d'obtenir des résultats quantitatifs.

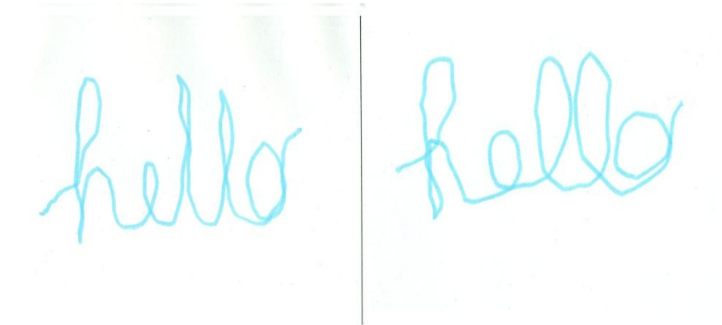
4.4.3 Analyse quantitative du résultat

Afin de conduire une analyse quantitative, nous avons besoin en premier lieu de définir des paramètres mesurables : l'objectif est d'examiner mathématiquement le style d'écriture d'une personne, tout en essayant de ne pas compliquer l'analyse. On considère dès lors quinze valeurs de distance, telles que représentées à la figure 4.6 : quatre valeurs pour la lettre *H*, trois pour la lettre *E* et les lettres *L* et deux valeurs pour la lettre *O*. Les valeurs sont les suivantes : les distances e_3 , l_3 et l_6 mesurent la hauteur du point d'intersection de la lettre *E* et des deux *L*. Les douze autres mesures, au contraire, représentent le grand rayon et le petit rayon des six ellipses composant le mot *hello* : deux ellipses pour la lettre *H*, une pour chaque autre lettre. Bien qu'il s'agisse d'une approximation, elle représente un indice raisonnable de la forme des lettres et indirectement du style d'écriture.

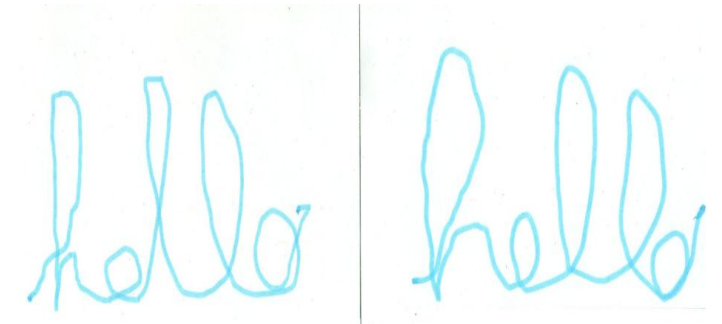
La figure 4.6 illustre comment les quinze distances ont été mesurées sur le mot *hello*. Cette figure représente également le modèle de référence choisi afin d'étudier les progrès



(a) Participant 1



(b) Participant 2

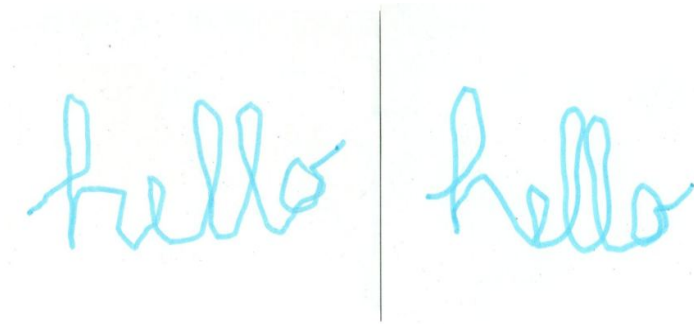


(c) Participant 3



(d) Participant 4

des élèves au cours de la séance d'apprentissage. Il ne s'agit pas d'un modèle idéal d'écriture mais du mot écrit par l'enseignant en utilisant l'appareil haptique avec sa



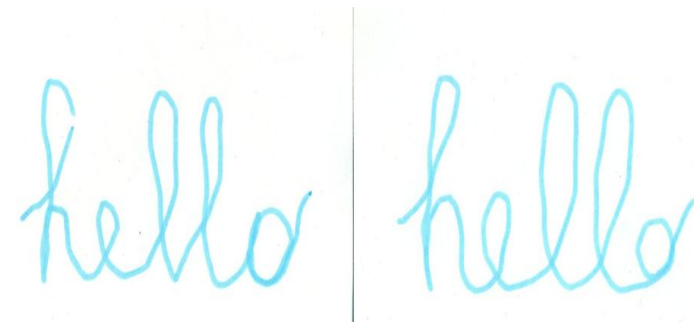
(e) Participant 5



(f) Participant 6



(g) Participant 7



(h) Participant 8

FIGURE 4.5 – Comparaison entre le premier et le dernier essai pour les huit participants.

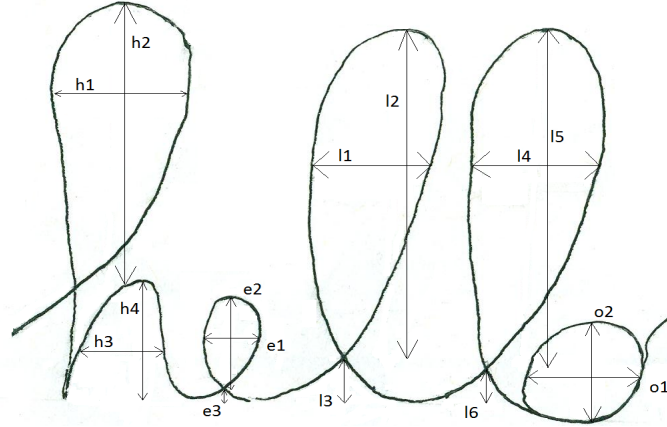


FIGURE 4.6 – Le modèle du mot *hello* et les distances considérées pour l’analyse.

main dominante. En comparant les lettres écrites par les participants et les lettres du modèle écrit par l’enseignant, nous pouvons évaluer mathématiquement l’influence de ce dernier sur ses élèves. Il ne faut pas oublier que l’enseignant reste le même pendant tout le test, autrement il ne serait pas possible de suivre cette stratégie. En résumé nous n’étudierons pas si l’élève a bien écrit le mot demandé mais plutôt s’il a appris ce que son enseignant lui a fait exécuter. Une autre précision est nécessaire avant de commencer l’analyse : l’utilisation de la figure 4.6 comme modèle de comparaison est aussi une approximation. En effet, on suppose que l’enseignant écrive tout le temps de la même façon, ce qui est humainement impossible. En revanche, il est cependant plausible de supposer qu’il ne change pas de style d’écriture en si peu de temps.

Suite à la définition du modèle de référence, l’analyse peut commencer. Dans un premier temps, nous mesurons les quinze distances sur le modèle, afin d’en obtenir les valeurs de référence. En second lieu, ces mêmes distances sont mesurées sur le premier et le dernier essai de chaque participant, c’est-à-dire sur tous les essais exécutés sans assistance haptique. Pour chaque essai expérimental, quinze mesures de distance sont prises en compte et doivent être comparées aux distances du modèle principal. Pour faire cela, nous définissons l’écart η tel que :

$$\eta_x = |x_{Model} - Dx_{Student}| \quad (4.25)$$

où x représente la distance considérée et D un coefficient de pondération. Cette équation s’applique à chacune des quinze distances, notamment

$$x \in [h_1, h_2, h_3, h_4, e_1, e_2, e_3, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, o_1, o_2]. \quad (4.26)$$

L’écart ainsi calculé représente la valeur absolue de la différence entre la distance de référence et la distance pondérée mesurée sur le mot écrit par le participant. Le coef-

ficient de pondération D est calculé tel que la racine carrée de la fraction A_{Model} sur $A_{Student}$, où A_{Model} indique l'estimation de la surface occupée par le modèle et $A_{Student}$ l'estimation de la surface occupée par le mot écrit par le participant, soit

$$D = \sqrt{\frac{A_{Model}}{A_{Student}}}. \quad (4.27)$$

La surface occupée représente la portion d'espace dont le participant a besoin pour écrire le mot demandé. Cette valeur est calculée de façon approximative telle que le produit de la hauteur maximale du mot et de sa longueur globale. En résumé, le coefficient de pondération sert à comparer le style d'écriture de différentes personnes sans prendre en considération la dimension des mots. En effet, malgré que la feuille de papier fournie aux participants pour le test soit déjà divisée en six parties égales, c'est-à-dire six cadres où l'élève est censé écrire les six *hello*, la personne peut écrire à sa guise, tant qu'elle reste dans le cadre, en prenant tout l'espace disponible ou juste une partie. Il est important de remarquer que l'enseignant n'impose pas la taille des mots à ses élèves, se limitant à suivre leurs mouvements et en corrigeant les fausses trajectoires en fonction de son style d'écriture. Afin de concentrer l'attention sur les proportions dans les lettres du mot *hello*, nous employons le coefficient de pondération : les mots sont ainsi à l'échelle et la comparaison peut se faire sans être biaisée.

Après avoir calculé tous les écarts, nous menons deux analyses distinctes : la première concernant directement les élèves et leurs progrès suite à la séance d'apprentissage, la deuxième sur les lettres mêmes du mot *hello* et leurs modifications.

4.4.4 Discussion

Les progrès des élèves

L'analyse se résume en l'histogramme de la figure 4.7. Pour chaque participant, tous les écarts du premier essai ont été additionnés ensemble, correspondant à la colonne de gauche, ainsi que tous les écarts du dernier essai, correspondant à la colonne de droite. Nous pouvons de cette façon faire une comparaison immédiate de la distance existant entre l'enseignant et l'élève, avant et après la séance d'apprentissage : une colonne plus longue indique une plus grande différence et vice versa. Tel que nous pouvons l'observer, cette distance se réduit pour tous les participants à la fin de la séance. Cela signifie que les élèves, en proportions différentes, se rapprochent tous du style d'écriture de leur enseignant grâce au feedback haptique transmis à travers le mécanisme parallèle et le système de télé-opération. Il est également intéressant de remarquer que le participant

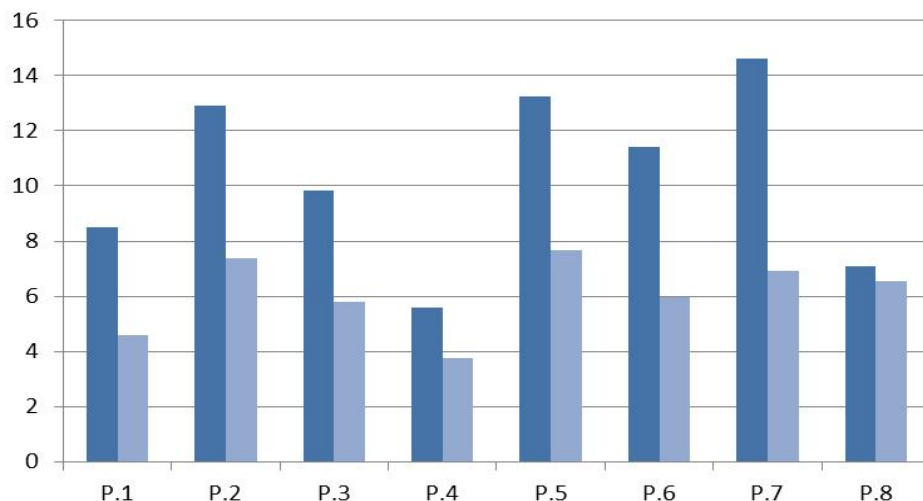


FIGURE 4.7 – Progrès des élèves. Chaque participant au test d’apprentissage est représenté par deux colonnes, c’est-à-dire la colonne de gauche et la colonne de droite, correspondant aux écarts du premier et du dernier essai. Les écarts sont mesurés en millimètres.

TABLE 4.1 – Test d’apprentissage : écarts entre les participants et l’enseignant (mm).

Participant	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6
P. 1	8,510	5,283	3,141	6,202	4,612	4,601
P. 2	12,911	6,463	6,651	8,812	6,987	7,373
P. 3	9,812	5,407	7,095	5,070	6,166	5,810
P. 4	5,582	4,084	4,606	3,601	5,105	3,745
P. 5	13,244	17,741	9,473	14,507	9,180	7,682
P. 6	11,397	8,152	7,434	9,837	7,826	5,978
P. 7	14,620	9,156	7,359	8,242	6,849	6,909
P. 8	7,069	7,381	6,144	6,659	7,023	6,562

ayant le plus grand écart au début du test soit celui dont la différence avec l’enseignant se réduit davantage. Sa façon d’écrire étant très différente de celle de son enseignant, l’influence de ce dernier a eu visiblement un effet plus grand sur lui que sur tous les autres participants.

Les valeurs de ces écarts, pour tout participant, sont illustrées au tableau 4.1.

Changement lettre par lettre

Cette deuxième analyse est résumée grâce à l’histogramme illustré sur la figure 4.8. À la différence du graphe présenté précédemment, nous étudions désormais le changement concernant chaque lettre suite à la séance d’apprentissage. Par conséquent, nous calculons pour chaque lettre la somme des écarts du premier essai de tous les participants, correspondant à la colonne de gauche de l’histogramme 4.8, et la somme des écarts du dernier essai de tous les participants, correspondant à la colonne de droite de l’histogramme. Pour la lettre *L*, nous calculons la valeur moyenne des deux lettres et utilisons une seule colonne de l’histogramme. Tel que nous pouvons l’observer, la tendance du deuxième histogramme est à la baisse : au dernier essai nous remarquons de nouveau une réduction globale de la différence entre l’enseignant et ses élèves par rapport au premier essai. Cette réduction se manifeste pour chacune des lettres, et en particulier pour la lettre *L*. Ce résultat aurait pu être prévu, car c’était en observant le changement de la lettre *L* sur les derniers essais de quelques participants que nous avons présumé de l’influence de l’enseignant sur eux. Ce graphe constitue en quelque sorte la preuve mathématique de cette observation.

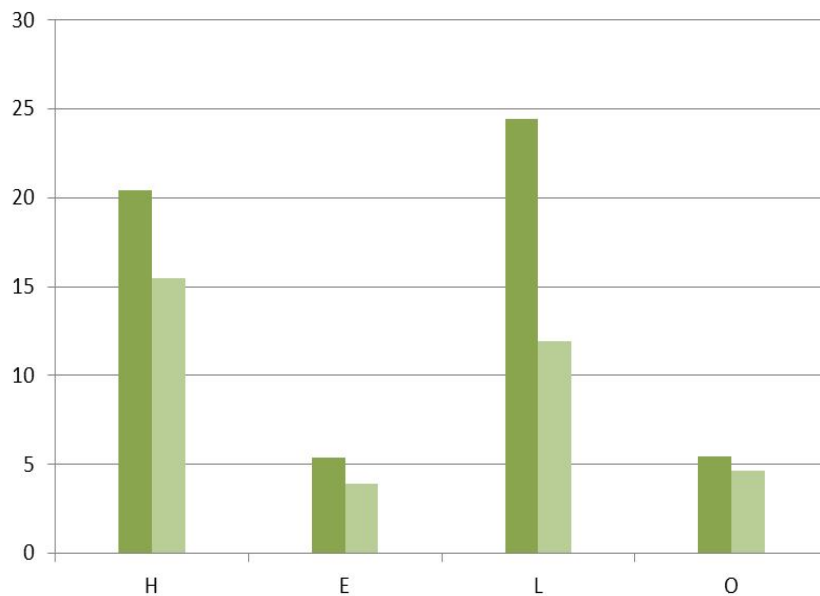


FIGURE 4.8 – Changement lettre par lettre. La colonne de gauche représente l’écart du premier essai, tandis que la colonne de droite correspond à l’écart du dernier essai. Ces écarts sont mesurés en millimètres.

Conclusion

Suite à l'observation qualitative et à l'analyse quantitative des résultats, nous pouvons affirmer que le dispositif haptique, ainsi que le système de télé-opération, permettent de transmettre certaines habiletés manuelles de façon rapide et efficace. L'efficacité a été démontrée au cours de l'analyse présentée précédemment, tandis que la rapidité est prouvée par le fait que les changements observés et analysés se sont reproduits suite à seulement quatre essais guidés. Ce mécanisme parallèle peut dès lors devenir très utile dans le processus d'apprentissage d'une personne. Un enseignant, à l'aide d'un dispositif haptique tel que le mécanisme parallèle proposé, peut influencer de façon significative son élève dans l'accomplissement de la tâche. Ce principe a été essayé et expérimenté pour une tâche d'écriture, mais cela aurait pu également s'appliquer à une tâche de dessin. Toutefois, il est important de remarquer que la réussite finale dépend fortement de l'enseignant et de ses capacités. Cette personne est censée être habile et aussi patiente, étant donné qu'elle doit guider l'étudiant pendant son apprentissage. L'enseignant retrouve donc un rôle principal dans ce processus, tandis que le système de télé-opération et le dispositif haptique ne jouent qu'un rôle de support. Ce rôle, bien que secondaire, demeure tout de même essentiel, puisque sans eux l'enseignant n'aurait pas pu enseigner la tâche demandée aussi rapidement à ses élèves. Ce dispositif est conçu pour être petit, simple à utiliser et portatif. Malgré sa taille, il est capable d'exercer une force considérable et tout à fait suffisante pour la tâche proposée.

4.5 Deuxième séance expérimentale : le test à blanc

Dans un second temps, nous nous posons la question suivante concernant le test avec le mécanisme parallèle : les changements observés suite à la séance d'apprentissage se sont-ils vérifiés grâce au feedback haptique fourni par l'enseignant à travers ce mécanisme ou sont-ils dus à une maîtrise naturelle de la tâche demandée ? Afin de répondre assurément à cette question, nous développons également un test à blanc, où le feedback haptique n'est plus utilisé. Avant de présenter ce deuxième test, cependant, il est important de rappeler que notre première analyse ne s'est pas concentrée sur la maîtrise de la main non-dominante dans l'exécution de la tâche, mais plutôt sur l'influence que l'enseignant a démontrée avoir sur ses élèves au cours de la séance expérimentale. Pour cette raison, nous devons désormais étudier si le rapprochement du style des élèves au style de l'enseignant pourrait être observé dans un test qui, bien que similaire à celui proposé auparavant, ne requerrait toutefois pas l'utilisation du mécanisme parallèle ni,

par conséquent, l'inclusion du feedback haptique dans la boucle.

4.5.1 Test à blanc

Le test à blanc se déroule comme suit : nous montrons aux participants le modèle du mot « hello », c'est-à-dire la représentation du style de l'enseignant du premier test, et nous leur demandons de le reproduire scrupuleusement en écrivant avec la main non-dominante. Le mécanisme parallèle et le feedback haptique n'étant pas inclus dans la boucle, le seul feedback est désormais le feedback visuel. Tout comme dans le premier test, les participants ont six essais afin de se rapprocher le plus possible du style de référence. Les résultats du test sont illustrés sur la figure 4.9 et analysés en détail dans la suite du chapitre.

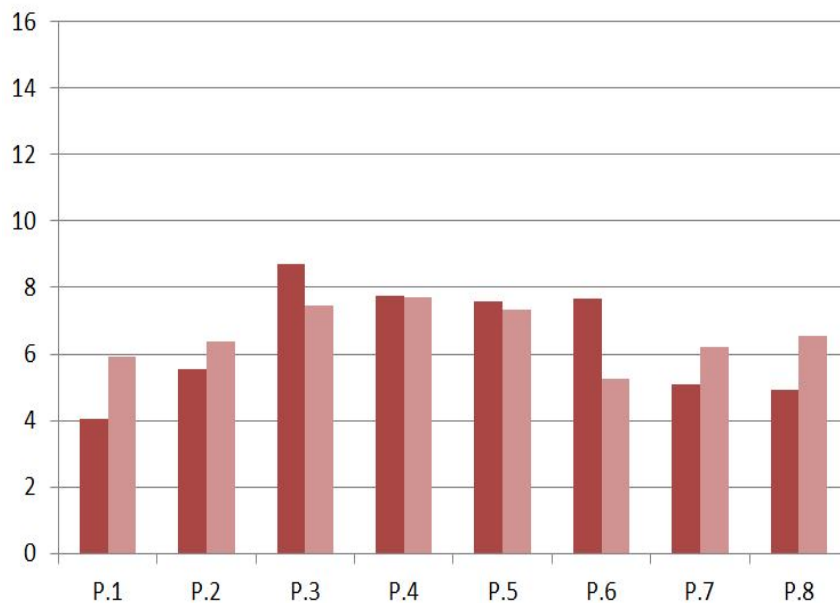


FIGURE 4.9 – Progrès des participants lors du test à blanc. Les deux colonnes, c'est-à-dire la colonne de gauche et la colonne de droite, correspondent aux écarts du premier et du dernier essai. Ces écarts sont mesurés en millimètres.

4.5.2 Discussion

En observant la figure 4.9, nous pouvons tout de suite remarquer deux choses : en premier lieu, l'écart entre les participants et l'enseignant du second test, dont le style d'écriture est utilisé comme modèle de référence, est plus petit par rapport à celui mesuré lors du premier test. En second lieu, et cet aspect est le plus important pour nous, cet écart ne semble pas diminuer de façon significative suite à la séance expérimentale. Il

TABLE 4.2 – Test à blanc : écarts entre les participants et le modèle de référence (mm).

Participant	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6
P. 1	4,038	4,449	4,402	5,076	5,104	5,918
P. 2	5,565	6,100	4,800	7,099	5,900	6,378
P. 3	8,689	7,605	7,596	7,201	8,268	7,469
P. 4	7,765	6,188	8,127	8,213	7,411	7,709
P. 5	7,588	7,720	7,529	7,057	7,400	7,314
P. 6	7,681	6,079	5,934	6,988	7,745	5,235
P. 7	5,068	4,828	5,446	5,502	5,672	6,221
P. 8	4,936	6,102	8,788	7,064	8,002	6,545

semble au contraire demeurer constant et parfois même augmenter. Seul le participant 6 semble s'améliorer grâce à cet entraînement, mais si l'on observe le tableau 4.2 on remarque qu'il n'y a pas d'évolution graduelle jusqu'au résultat final et que l'écart du sixième essai est essentiellement un heureux hasard. Cette constance regarde en effet tous les participants, au contraire de ce que l'on a observé pour le premier test.

4.5.3 Feedback visuel versus feedback haptique

Les résultats obtenus lors du test d'apprentissage et lors du test à blanc sont diamétralement opposés, tel que cela peut être observé sur la figure 4.10. En ce qui concerne le premier, durant lequel les participants ont pu bénéficier du retour de force, nous avons remarqué, au début de la séance d'apprentissage, une différence très variable mais, dans l'ensemble, plutôt grande entre le style d'écriture de l'enseignant et celui de ses élèves. À la fin de cette première séance de test, ladite différence a fortement diminué et ce pour chacun des participants. En revanche, en ce qui concerne le test à blanc, bien que la différence entre le style des participants et le modèle soit dès le début plus petite, aucun progrès n'est observé au cours de la séance.

Le grand écart entre l'enseignant et les élèves observé au premier essai du premier test est explicable par le fait que nous n'avions pas demandé aux participants d'écrire comme l'enseignant, mais tout simplement de suivre une trajectoire. Chacun l'a fait à sa guise dans un premier temps, tandis que par la suite l'influence de l'enseignant a eu tout son effet. Lors du deuxième test, cet effet a manqué : les participants ont été capables d'imiter le style de référence, la tâche n'étant évidemment pas très compliquée, mais sans parvenir, toutefois, à s'y rapprocher davantage. Prenons à titre d'exemple le participant

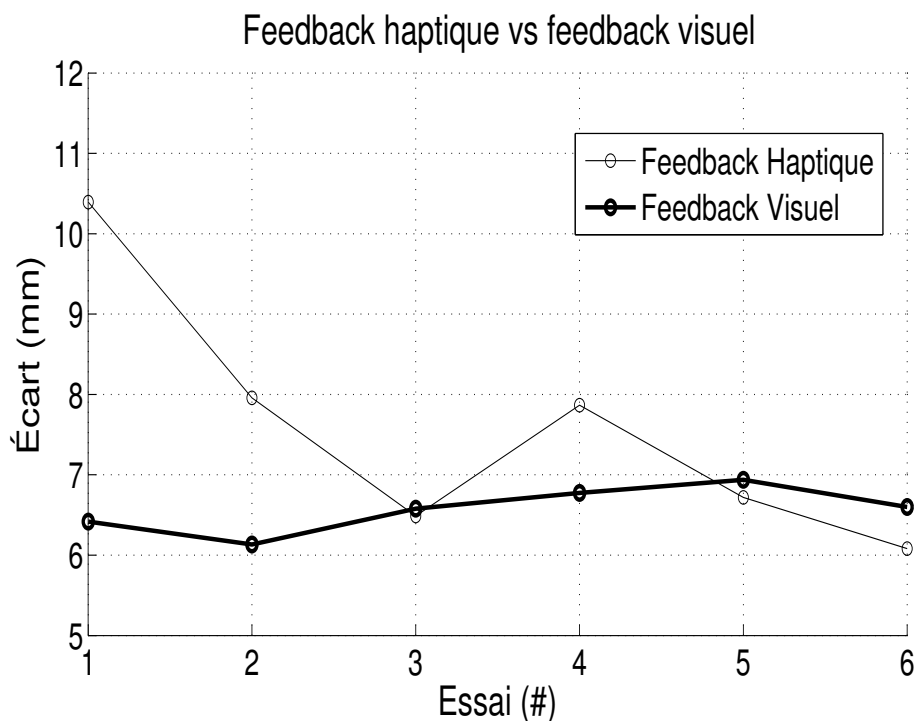


FIGURE 4.10 – Évolution de la différence entre le style de référence et les participants lors des deux tests.

5, qui a démontré avoir une bonne assurance avec sa main non-dominante et dont les six essais sont illustrés sur la figure 4.11. Son résultat est le plus représentatif : nous pouvons observer que, malgré qu’il écrive bien, aucune des caractéristiques typiques du modèle de référence, telles que par exemple les lettres *L* bien rondes et avec un point d’intersection des deux courbes très bas, ne peut être relevée dans son style. De plus, aucun changement ne tend à se produire, tel que cela est démontré par l’écart constant entre son style et le modèle de référence (Tableau 4.2).

Nous pouvons conclure que seul le feedback haptique peut créer un lien entre l’enseignant et son élève permettant à ce dernier d’acquérir plus rapidement et efficacement les habilités de son maître.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle approche pour l’apprentissage de l’écriture par le biais d’un système de télé-opération bilatéral, favorisant l’interaction humain-humain au lieu de l’interaction humain-robot habituellement proposée dans la littérature. Le système de télé-opération a été constitué de deux mécanismes parallèles



FIGURE 4.11 – Résultat d'un participant au test à blanc.

à cinq barres et deux degrés de liberté, que nous avons contrôlés en utilisant une loi de commande par impédance permettant de suivre les positions désirées. Aussi bien le mécanisme parallèle que la loi de commande employée avaient déjà été présentés dans la littérature précédente [Frisoli et al., 1999], [Hogan, 1984]. La nouveauté consiste ici en la stratégie d'utilisation de ce mécanisme et de la commande visant l'apprentissage assisté à distance.

Le but du chapitre fut d'explorer les potentialités de l'interaction haptique en temps réel entre deux utilisateurs et l'influence que l'un, jouant le rôle d'enseignant, peut avoir sur l'autre, représentant son élève, dans l'accomplissement d'une tâche d'écriture. Afin de tester et d'évaluer cette approche un test fut proposé à un groupe de huit personnes. Nous leur avons demandé d'apprendre à écrire un mot en utilisant le dispositif haptique avec la main non-dominante, à l'aide d'un feedback haptique fourni par l'enseignant. Une première observation des résultats nous amena à développer une analyse plus rigoureuse desdits résultats. Nous pûmes dès lors confirmer nos premières impressions : l'influence de l'enseignant sur ses élèves est impressionnante, le style d'écriture changeant de façon significative suite à un nombre réduit d'essais expérimentaux. Le test nous dit que l'utilisation des dispositifs haptiques composant le système de télé-opération permet à l'enseignant de transmettre ses connaissances et ses habilités rapidement et efficacement.

Un deuxième test fut proposé dans un second temps afin de vérifier que ce changement de style des participants résultait bien de l'interaction avec l'enseignant et non d'une simple maîtrise de la tâche. Le résultat du test à blanc étant le contraire de celui du premier test d'apprentissage, nous avons confirmé que, en l'absence d'un feedback haptique, la différence de style entre les participants et le modèle de référence ne change pas.

En conclusion, il est important de remarquer le point commun entre ce dernier chapitre et le sujet principal de la thèse, c'est-à-dire la perception d'un signal haptique. Bien que l'application spécifique soit différente, puisque nous sommes en effet passés de la poignée de main à l'apprentissage assisté de l'écriture, les éléments se situant à la base même de la présente thèse, tels que la transmission du signal haptique, l'importance de celui-ci dans les relations humaines ainsi que l'influence qu'il peut avoir sur les personnes sont eux, au contraire, communs à ces deux travaux.

Conclusion

Cette thèse apporte une importante contribution dans le domaine de la communication haptique à distance, aussi bien pour ce qui est du design des nouvelles interfaces que pour le contrôle de celles-ci. La principale contribution de ce travail est représentée par l'interface anthropomorphe pour la poignée de main présentée au chapitre 2 tandis que l'application la plus intéressante de celle-ci est le système de communication composé de deux interfaces permettant aux utilisateurs de se serrer la main à distance. L'objectif de cette recherche est de contribuer au développement de la technologie haptique comme moyen de communication entre les personnes. Nous avons également démontré l'importance d'une interaction haptique dans une application différente, telle que l'apprentissage à l'écriture. Lors d'une collaboration entre l'enseignant et l'élève par le biais d'un système de télé-opération, l'apprentissage de l'élève se révèle plus rapide et fortement influencé par son maître. Cette influence n'existe pas en l'absence du retour de force haptique. Nous allons maintenant présenter une brève revue des principales contributions de cette thèse en prenant en considération un chapitre à la fois.

Le premier chapitre a été entièrement consacré à la description des deux principales lois de commande de cette thèse, notamment la loi de commande par impédance et la loi de commande par admittance. Les deux commandes sont définies comme étant des contrôleurs en force indirecte qui partagent la même équation, bien que leurs applications soient différentes. En premier lieu, nous avons étudié et implémenté la commande par impédance, laquelle ne nécessite pas de capteurs de force. Ce contrôleur peut être utilisé comme un contrôleur en position traditionnel parce qu'il permet de réaliser un suivi de position de façon précise et stable. En raison de ses bonnes performances, nous l'avons utilisé à plusieurs reprises lorsqu'un contrôleur en position était requis. En second lieu, nous avons implémenté une commande par admittance, pour laquelle il a fallu ajouter un capteur de force dans la boucle de contrôle. Les capteurs de force permettant de déduire les intentions de l'utilisateur humain, la commande par admittance permet une interaction humain-robot intuitive et sécuritaire. Quelques tests ont

été proposés dans le premier chapitre afin d'ajuster certains paramètres des deux lois de commande et d'obtenir la meilleure réponse possible. Tous ces tests ont été réalisés en utilisant un système de télé-opération composé d'un type de mécanisme très simple, afin de concentrer l'attention sur la loi de commande.

Les lois de commande présentées dans ce chapitre avaient déjà été proposées dans la littérature. En effet, le chapitre 1 ne représente pas une contribution de la thèse à la littérature, mais il constitue davantage une base à partir de laquelle les applications illustrées dans les chapitres suivants ont été fondées.

Le deuxième chapitre a présenté l'interface haptique anthropomorphe dont l'objectif est de reproduire physiquement la poignée de main. Ce travail se divise en trois parties principales : la conception et l'étude mécanique de l'interface, les modifications à la commande nécessaires afin d'obtenir un comportement réaliste et enfin, une séance expérimentale permettant de valider le dispositif vient clore ce chapitre. Nous avons donc, dans un premier temps, élaboré le design de l'interface, lequel a constitué un problème complexe. Il a en effet fallu choisir les composants garantissant une performance adéquate et ce aussi bien pour une paume réactive que pour des doigts sous-actionnés. Certaines simplifications et hypothèses se sont révélées nécessaires. La première partie de la séance expérimentale fut d'ailleurs dédiée à leur vérification. Dans un deuxième temps, nous nous sommes concentrés sur la loi de commande de l'interface. Celle-ci est une commande par admittance pour laquelle certaines modifications ont été apportées par rapport à la première version présentée. Enfin, une séance expérimentale avec un groupe de volontaires a été réalisée. Cette séance proposait une interaction humain-robot par le biais d'un robot KUKA LWR utilisé tel qu'un bras mécanique. Au cours de celle-ci les participants ont pu serrer l'interface comme si celle-ci était la main d'une autre personne. Les valeurs des forces échangées et les positions du bras et de l'interface ont été analysées et illustrées. Les commentaires des participants ont également été rapportés et, suite à ces commentaires, nous avons pu proposer des modifications à apporter au contrôle de l'interface, et ce afin d'en améliorer le rendu haptique.

La contribution principale de ce chapitre est donc la nouvelle interface anthropomorphe pour la poignée de main humain-robot, que nous avons nommée HARRI. À notre connaissance, il s'agit de l'interface la plus avancée présentée jusqu'à nos jours.

Le troisième chapitre a été dédié à la communication haptique à distance. Nous avons présenté trois systèmes de télé-opération bilatéraux pour la transmission d'un signal haptique à distance. Les télé-opérateurs composant ces systèmes étant différents et de plus en plus élaborés, le signal haptique transmis et sa perception changea pour les trois

systemes. Le premier systeme que nous avons teste fut celui compose de deux mecanismes a bras de levier a un degre de liberte, c'est-a-dire celui qui avait ete utilise dans le premier chapitre afin de perfectionner la commande par admittance. Ce mecanisme etant tres simple, le systeme de tele-operation ne garantissait pas des performances exceptionnelles. Toutefois, nous avons demontre lors d'un premier test que ce systeme permettait d'identifier une sequence de trois ressorts de differente raideur en les manipulant a distance. Un deuxieme test demandant d'identifier quatre objets se revela au contraire plus complique. Le deuxieme systeme de tele-operation fut compose de deux mecanismes a pince a un degre de liberte constituant la premiere etape de la conception de l'interface anthropomorphe. Afin de tester ce systeme, nous avons repropose le test pour l'identification des quatre objets. Grace a un meilleur rendu haptique fourni par le mecanisme a pince, les participants reussirent le test et furent capables de distinguer les quatre objets. Ce resultat nous a donc permis de valider la future paume reactive du dispositif HARRI. Le dernier systeme presente dans ce chapitre a ete compose de deux interfaces anthropomorphes, son objectif etant de reproduire la poignee de main a distance entre deux utilisateurs. Dans un premier temps, nous avons presente l'algorithme de commande incluant desormais deux utilisateurs et deux interfaces. Par la suite nous avons propose une seance experimentale en montant les deux interfaces sur les deux bras d'un robot Baxter. Les personnes participant a cette nouvelle seance ont pu se serrer la main a distance et ont commente positivement l'experience. Tel que nous l'avons fait pour le test avec le robot KUKA LWR, les donnees de position et de force aussi bien du robot Baxter que des deux HARRI ont ete illustrees et analysees. Finalement, les donnees recoltees lors de la seance avec le robot Baxter nous ont permis de construire un mecanisme a rail vertical a un degre de liberte. L'objectif de ce systeme est de remplacer le robot Baxter en ameliorant les performances du systeme pour la poignee de main a distance en termes de synchronisation entre les mouvements des bras des utilisateurs.

La contribution principale de ce chapitre est le developpement d'un systeme de communication haptique permettant a deux utilisateurs de se serrer la main a distance. D'autres systemes de tele-operation ont egalement ete presentes, mettant en evidence les capacites de tels systemes pouvant transmettre le seul retour de force haptique.

Le quatrieme chapitre a presente un nouveau systeme de tele-operation a distance dont l'application etait differente de la poignee de main. Le signal haptique n'etant plus utilise que comme un moyen de communication, son emploi fut alors destine a l'apprentissage guide de l'ecriture manuelle. Un mecanisme a cinq barres et deux degres

de liberté a été proposé afin de réaliser ce système, lequel était composé de deux de ces mécanismes contrôlés par le biais d'une loi de commande par impédance, telle que nous l'avons présentée au chapitre 1. Suite à la description du mécanisme et de sa cinématique, nous avons proposé une séance d'apprentissage afin d'en vérifier la validité. Huit personnes ont participé à cette séance expérimentale. Nous leur avons demandé d'écrire un mot connu (*hello*) utilisant le mécanisme à cinq barres avec leur main non-dominante et à l'aide d'un feedback haptique fourni par un enseignant. Ce dernier pouvant les corriger et les guider en temps réel lors de l'exécution de la tâche, les participants ont démontré un changement de leur style d'écriture au cours du test, en le rapprochant au style de l'enseignant. Il fut alors prouvé que cette influence était une conséquence de l'apprentissage guidé à l'aide du feedback haptique. Afin de valider cette conclusion un test à blanc a également été proposé. Son résultat fut opposé à celui du premier test. En effet, en absence d'un signal haptique, les élèves furent capables de reproduire le style de l'enseignant, plus ou moins bien selon leurs capacités, mais ils ne parvinrent pas à s'en rapprocher davantage.

La contribution principale de ce dernier chapitre est donc la démonstration de l'influence de l'haptique dans les communications entre les individus et, plus précisément, dans le cadre d'un processus d'apprentissage. Nous avons démontré qu'à l'aide d'un système de télé-opération relativement simple un enseignant pouvait enseigner à ses élèves à écrire plus rapidement et plus efficacement. De plus, à notre connaissance, cette approche humain-humain dans le processus d'apprentissage de l'écriture manuelle n'avait jamais été implémentée telle que nous l'avons présentée.

Travaux futurs

Le premier chapitre étant simplement dédié à l'introduction de la commande en force et à son implémentation, nous pouvons mettre en évidence le travail qui pourrait être continué suite à cette thèse en analysant les trois autres chapitres séparément.

Le deuxième chapitre a présenté la nouvelle interface anthropomorphe pour la poignée de main (HARRI). Le prototype proposé dans cette thèse est un prototype expérimental, à quelques exceptions près entièrement constitué de pièce en ABS, donc forcément plus fragile et moins fort qu'un prototype en métal. Les moteurs utilisés garantissent de bonnes performances bien que celles-ci pourraient toutefois être améliorées en remplaçant ces moteurs par d'autres plus puissants. Dans le futur, il serait certainement intéressant de concevoir un nouveau prototype de HARRI en métal, afin de le rendre plus fort, plus résistant et surtout plus performant.

Le troisième chapitre a présenté trois systèmes de télé-opération dont le dernier permettait à deux utilisateurs de se serrer la main. Afin d'implémenter cette interaction, nous avons utilisé dans un premier temps un robot Baxter en guise de support pour les deux interfaces. Afin de reproduire une poignée de main dans son ensemble, les deux bras du robot Baxter ont été programmés afin de suivre la même trajectoire. Les mouvements des bras des deux utilisateurs étaient donc transmis à travers le système de télé-opération. L'emploi du robot Baxter nous a permis dès lors de tester les deux interfaces et d'étudier le comportement de deux personnes se serrant la main à distance avant de réaliser un système prévu à cet effet. Toutefois, la réalisation d'un système de bras robotiques spécialement conçus pour la poignée de main à distance s'avère pertinente, le robot Baxter ayant en effet plusieurs défauts importants. Les données sauvegardées au cours de la séance avec le robot KUKA LWR et avec le robot Baxter sont précieuses à cet égard. En effet, nous savons désormais que les bras robotiques peuvent être caractérisés par seulement deux ou même un degré de liberté, les déplacements principaux ayant lieu sur l'axe vertical, à condition que d'autres mouvements secondaires soient garantis par une certaine compliance du système. Un mécanisme à rail vertical permettant des mouvements verticaux est donc conçu. La raideur de ce mécanisme garantit de meilleures performances et une synchronisation des mouvements des bras des utilisateurs. En revanche, ce mécanisme pourra être modifié dans un futur, afin d'ajouter une certaine compliance au système. À titre d'exemple, un degré de liberté, peut-être passif, permettant un mouvement libre du poignet de l'utilisateur pourrait améliorer davantage le ressenti haptique global du système.

Le quatrième chapitre a abordé le problème de la technologie haptique dans le domaine de la réadaptation, l'application spécifique étant l'aide à l'écriture. Nous avons démontré l'importance d'une communication haptique entre l'enseignant et son élève en utilisant pourtant un mécanisme très basique et capable de se déplacer uniquement sur le plan horizontal. Il serait intéressant d'approfondir cette recherche en concevant un dispositif haptique plus élaboré permettant des mouvements plus complexes.

En conclusion, il est important de remarquer que tous les systèmes de communication présentés dans cette thèse, aussi bien ceux permettant une simple interaction que d'autres prévus pour un apprentissage à distance, ont été étudiés et validés en absence de quelconque retard temporel. Toutefois, l'objectif final étant de mettre en communication deux personnes se trouvant dans deux endroits séparés, il serait intéressant de prendre en considération un éventuel retard temporel, afin que le rendu haptique du système ne soit pas compromis à cause de ce retard.

Bibliographie

- M Osama Alhalabi and Susumu Horiguchi. Tele-handshake : a cooperative shared haptic virtual environment. In *Proc. EuroHaptics*, pages 60–64, 2001.
- Florence Bara and Edouard Gentaz. Haptics in teaching handwriting : The role of perceptual and visuo-motor skills. *Human movement science*, 30(4) :745–759, 2011.
- Mathieu Baril, Thierry Laliberté, François Guay, and Clément Gosselin. Static analysis of single-input/multiple-output tendon-driven underactuated mechanisms for robotic hands. In *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pages 155–164. American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- Mathieu Baril, Thierry Laliberté, Clément Gosselin, and François Routhier. On the design of mechanically programmable underactuated anthropomorphic robotic and prosthetic grippers. In *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pages 85–94. American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- Angelo Basteris, Lino Bracco, and Vittorio Sanguineti. Robot-assisted intermanual transfer of handwriting skills. *Human Movement Science*, 31(5) :1175 – 1190, 2012. ISSN 0167-9457. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.humov.2011.12.006>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167945712000061>.
- V. Begoc, S. Krut, E. Dombre, C. Durand, and F. Pierrot. Mechanical design of a new pneumatically driven underactuated hand. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pages 927–933, April 2007. doi : 10.1109/ROBOT.2007.363104.
- Frank J Bernieri and Kristen N Petty. The influence of handshakes on first impression accuracy. *Social Influence*, 6(2) :78–87, 2011.

- Lionel Birglen and Clément M Gosselin. Kinetostatic analysis of underactuated fingers. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 20(2) :211–221, 2004.
- Lionel Birglen, Clément Gosselin, and Thierry Laliberté. *Underactuated robotic hands*, volume 40. Springer, 2008.
- Claude Bonnet. *Manuel pratique de psychophysique*. A. Colin, 1986.
- Scott Brave and Andrew Dahley. inTouch : a medium for haptic interpersonal communication. In *CHI '97 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '97*, pages 363–364, New York, NY, USA, 1997. ACM. ISBN 0-89791-926-2. doi : 10.1145/1120212.1120435. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1120212.1120435>.
- Grigore C Burdea, Grigore C Burdea, and Cristian Burdea. *Force and touch feedback for virtual reality*. Wiley New York, 1996.
- Joerg Butterfaß, Gerd Hirzinger, S Knoch, and Hong Liu. Dlr’s multisensory articulated hand I. hard-and software architecture. In *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2081–2086. IEEE, 1998.
- Jörg Butterfaß, Markus Grebenstein, Hong Liu, and Gerd Hirzinger. Dlr-hand II : Next generation of a dextrous robot hand. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 109–114. IEEE, 2001.
- Craig R Carignan and Pontus A Olsson. Cooperative control of virtual objects over the internet using force-reflecting master arms. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1221–1226. IEEE, 2004.
- Jongeun Cha, Mohamad A. Eid, Ahmad Barghout, A. S. M. Mahfujur Rahman, and Abdulmotaleb El-saddik. HugMe : synchronous haptic teleconferencing. In *ACM Multimedia Conference*, pages 1135–1136, 2009. doi : 10.1145/1631272.1631535.
- Angela Chang and Conor O’Sullivan. Audio-haptic feedback in mobile phones. In *CHI'05 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pages 1264–1267. ACM, 2005.
- Angela Chang, Zahra Kanji, and Hiroshi Ishii. Designing touch-based communication devices. In *Proceedings of Workshop*, number 14, 2001.

- Angela Chang, Sile O'Modhrain, Rob Jacob, Eric Gunther, and Hiroshi Ishii. Com-touch : design of a vibrotactile communication device. In *Proceedings of the 4th conference on Designing interactive systems : processes, practices, methods, and techniques*, pages 312–320. ACM, 2002.
- Kup-Sze Choi and King-Hung Lo. A hand rehabilitation system with force feedback for children with cerebral palsy : two case studies. *Disability and Rehabilitation*, 33(17-18) :1704–1714, 2011. doi : 10.3109/09638288.2010.535091. URL <http://informahealthcare.com/doi/abs/10.3109/09638288.2010.535091>. PMID : 21110729.
- J Edward Colgate, Michael A Peshkin, and Stephen H Klostermeyer. Intelligent assist devices in industrial applications : a review. In *IROS*, pages 2516–2521, 2003.
- S Costo and R Molfino. A new robotic unit for onboard airplanes bomb disposal. In *35th International symposium on robotics ISR*, pages 23–26, 2004.
- April H Crusco and Christopher G Wetzel. The midas touch the effects of interpersonal touch on restaurant tipping. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 10(4) :512–517, 1984.
- Joris De Schutter, Herman Bruyninckx, Wen-Hong Zhu, and Mark W Spong. Force control : a bird's eye view. In *Control Problems in Robotics and Automation*, pages 1–17. Springer, 1998.
- Gurpreet Singh Dhillon and Kenneth W Horch. Direct neural sensory feedback and control of a prosthetic arm. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 13(4) :468–472, 2005.
- Carl DiSalvo, Francine Gemperle, Jodi Forlizzi, and Elliott Montgomery. The hug : an exploration of robotic form for intimate communication. In *Robot and Human Interactive Communication, 2003. Proceedings. ROMAN 2003. The 12th IEEE International Workshop on*, pages 403–408. IEEE, 2003.
- Chris Dodge. The bed : a medium for intimate communication. In *CHI'97 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 371–372. ACM, 1997.
- Rajiv V Dubey, Tan Fung Chan, and Steve E Everett. Variable damping impedance control of a bilateral telerobotic system. *Control Systems, IEEE*, 17(1) :37–45, 1997.

- Vincent Duchaine and Clément M Gosselin. General model of human-robot cooperation using a novel velocity based variable impedance control. In *EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007. Second Joint*, pages 446–451. IEEE, 2007.
- William R Ferrell. Remote manipulation with transmission delay. *Human Factors in Electronics, IEEE Transactions on*, (1) :24–32, 1965.
- David Feygin, Madeleine Keehner, and Frank Tendick. Haptic guidance : Experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill. In *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 40–, 2002.
- BJ Fogg, Lawrence D Cutler, Perry Arnold, and Chris Eisbach. Handjive : a device for interpersonal haptic entertainment. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 57–64. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1998.
- Lawrence K Frank. Tactile communication. *Genetic psychology monographs*, 1957.
- Gene F Franklin, J David Powell, and Abbas Emami-Naeini. *Feedback control of dynamic systems*. Addison-Wesley Reading, MA, 1986.
- A. Frisoli, G.M. Prisco, F. Salsedo, and M. Bergamasco. Hi : a two degrees-of-freedom planar, highly isotropic haptic interface for the desktop. In *Proc. SPIE*, pages 65–75, Bellingham, WA, 1999.
- Bill Gaver. Provocative awareness. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 11(3-4) :475–493, 2002.
- Francine Gemperle, Carl DiSalvo, Jodi Forlizzi, and Willy Yonkers. The hug : a new form for communication. In *Proceedings of the 2003 conference on Designing for user experiences*, pages 1–4. ACM, 2003.
- Oleg Gerovichev, Panadda Marayong, and Allison M Okamura. The effect of visual and haptic feedback on manual and teleoperated needle insertion. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2002*, pages 147–154. Springer, 2002.
- George A Gescheider. *Psychophysics : the fundamentals*. Psychology Press, 2013.

- Matthew T Gettman, Michael L Blute, George K Chow, Richard Neururer, Georg Bartsch, and Reinhard Peschel. Robotic-assisted laparoscopic partial nephrectomy : technique and initial clinical experience with davinci robotic system. *Urology*, 64(5) : 914–918, 2004.
- R. Gillespie, M. O’Modhrain, P. Tang, D. Zaretzky, and C. Pham. The virtual teacher. In *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, pages 171–178, 1997.
- Ray C Goertz. Mechanical master-slave manipulator. *Nucleonics (US) Ceased publication*, 12, 1954.
- Raymond C Goertz. Fundamentals of general purpose remote manipulators. *Nucleonics*, 10(11) :36–42, 1952.
- Michael A. Goodrich and Alan C. Schultz. Human-robot interaction : A survey. *Foundations and trends in human-computer interaction*, 1(3) :203–275, January 2007. ISSN 1551-3955. doi : 10.1561/11000000005. URL <http://dx.doi.org/10.1561/11000000005>.
- G Mo Goodwin, DI McCloskey, and PBC Matthews. The contribution of muscle afferents to kinesiesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain*, 95(4) :705–748, 1972.
- Clément Gosselin, Frédéric Pelletier, and Thierry Laliberté. An anthropomorphic underactuated robotic hand with 15 dofs and a single actuator. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 749–754. IEEE, 2008.
- Gary Guthart and John Kenneth Salisbury Jr. The intuitivem telesurgery system : Overview and application. In *ICRA*, pages 618–621, 2000.
- Antal Haans and Wijnand IJsselsteijn. Mediated social touch : a review of current research and future directions. *Virtual Reality*, 9(2-3) :149–159, 2006.
- Peter M Hall and Dee Ann Spencer Hall. The handshake as interaction. *Semiotica*, 45 (3-4) :249–264, 1983.
- Blake Hannaford and Allison M Okamura. Haptics. *Springer Handbook of Robotics*, pages 719–739, 2008.

- Rebecca Hansson and Tobias Skog. The lovebomb : Encouraging the communication of emotions in public spaces. In *CHI'01 extended abstracts on Human Factors in computing systems*, pages 433–434. ACM, 2001.
- H. Hashimoto and S. Manoratkul. Tele-handshake through the internet. In *Robot and Human Communication, 1996., 5th IEEE International Workshop on*, pages 90–95, 1996. doi : 10.1109/ROMAN.1996.568767.
- Yvette Hatwell, Arlette Streri, and Edouard Gentaz. *Touching for knowing : cognitive psychology of haptic manual perception*, volume 53. John Benjamins Publishing, 2003.
- R Hayashi, A Miyake, H Jijiwa, and S Watanabe. Postural readjustment to body sway induced by vibration in man. *Experimental Brain Research*, 43(2) :217–225, 1981.
- V. Hayward and K.E. MacLean. Do it yourself haptics : part I. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 14(4) :88–104, Dec 2007. ISSN 1070-9932. doi : 10.1109/M-RA.2007.907921.
- Bernard Hennion, Edouard Gentaz, Philippe Gouagout, and Florence Bara. Telemaque, a new visuo-haptic interface for remediation of dysgraphic children. In *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, WHC '05*, pages 410–419, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society. ISBN 0-7695-2310-2. doi : 10.1109/WHC.2005.125. URL <http://dx.doi.org/10.1109/WHC.2005.125>.
- Neville Hogan. Impedance control : An approach to manipulation. In *American Control Conference, 1984*, pages 304–313. IEEE, 1984.
- Neville Hogan. Impedance control : An approach to manipulation : Part I — theory. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 107(1) :1–7, 1985a.
- Neville Hogan. Impedance control : An approach to manipulation : Part II — implementation. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 107(1) :8–16, 1985b.
- Neville Hogan. Impedance control : An approach to manipulation : Part III — applications. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 107(1) :17–24, 1985c.
- Peter F Hokayem and Mark W Spong. Bilateral teleoperation : An historical survey. *Automatica*, 42(12) :2035–2057, 2006.

- SK Alamgir Hossain, Abu Saleh Md Mahfujur Rahman, and Abdulmotaleb El Saddik. Interpersonal haptic communication in second life. In *Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 1–4. IEEE, 2010a.
- SK Alamgir Hossain, Abu Saleh Md Mahfujur Rahman, and AE Saddik. Haptic based emotional communication system in second life. In *Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 1–1. IEEE, 2010b.
- R. Ikeura, A. Morita, and K. Mizutani. Variable damping characteristics in carrying an object by two humans. In *Robot and Human Communication, 1997. RO-MAN '97. Proceedings., 6th IEEE International Workshop on*, pages 130–134, Sep 1997. doi : 10.1109/ROMAN.1997.646969.
- R. Ikeura, T. Moriguchi, and K. Mizutani. Optimal variable impedance control for a robot and its application to lifting an object with a human. In *Robot and Human Interactive Communication, 2002. Proceedings. 11th IEEE International Workshop on*, pages 500–505, 2002. doi : 10.1109/ROMAN.2002.1045671.
- Ryojun Ikeura and Hikaru Inooka. Variable impedance control of a robot for cooperation with a human. In *Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 3097–3102. IEEE, 1995.
- D. Jack, R. Boian, A.S. Merians, M. Tremaine, G.C. Burdea, S.V. Adamovich, M. Recce, and H. Poizner. Virtual reality-enhanced stroke rehabilitation. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 9(3) :308 –318, sept. 2001. ISSN 1534-4320. doi : 10.1109/7333.948460.
- SC Jacobsen, EK Iversen, D Knutti, R Johnson, and K Biggers. Design of the utah/mit dextrous hand. In *Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 1520–1532. IEEE, 1986.
- Mitsuru Jindai and Tomio Watanabe. Development of a handshake request motion model based on analysis of handshake motion between humans. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on*, pages 560–565. IEEE, 2011.
- F Jones, H Ryffel, E Oberg, C McCauley, and R Heald. *Machinery's Handbook. Toolbox Edition*. Industrial Press, Inc, 2004.

- Lynette A Jones. The control and perception of finger forces. In *The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development*, pages 99–122. Springer, 2014.
- Stanley E Jones and A Elaine Yarbrough. A naturalistic study of the meanings of touch. *Communications Monographs*, 52(1) :19–56, 1985.
- Christian Kaernbach. Simple adaptive testing with the weighted up-down method. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 49(3) :227–229, 1991.
- Tomofumi Kasuga and Minoru Hashimoto. Human-robot handshaking using neural oscillators. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 3802–3807. IEEE, 2005.
- Seiichiro Katsura and Kouhei Ohnishi. A realization of haptic training system by multilateral control. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 53(6) :1935–1942, 2006.
- Noriyuki Kawarazaki, Yuuki Kitajima, Kazuya Kojima, and Tadashi Yoshidime. Communication robot system based on the handshaking action. In *World Automation Congress (WAC), 2010*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- H. Kawasaki, T. Komatsu, and K. Uchiyama. Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor : Gifu hand II. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 7(3) :296–303, Sep 2002. ISSN 1083-4435. doi : 10.1109/TMECH.2002.802720.
- Behzad Khademian and Keyvan Hashtrudi-Zaad. A four-channel multilateral shared control architecture for dual-user teleoperation systems. In *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2660–2666. IEEE, 2007.
- Behzad Khademian and Keyvan Hashtrudi-Zaad. A robust multilateral shared controller for dual-user teleoperation systems. In *Electrical and Computer Engineering, 2008. CCECE 2008. Canadian Conference on*, pages 001871–001876. IEEE, 2008.
- Younhee Kim, Zoran Duric, Naomi Lynn Gerber, Arthur R. Palsbo, and Susan E. Palsbo. Demo : Teaching letter writing using a programmable haptic device interface for children with handwriting difficulties. *3D User Interfaces*, 0 :157, 2009. doi : <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/3DUI.2009.4811234>.

- K. Kosuge and N. Kazamura. Control of a robot handling an object in cooperation with a human. In *Robot and Human Communication, 1997. RO-MAN '97. Proceedings., 6th IEEE International Workshop on*, pages 142–147, Sep 1997. doi : 10.1109/ROMAN.1997.646971.
- H. Krebs, N. Hogan, W. Hening, S. Adamovich, and H. Poizner. Procedural motor learning in parkinson’s disease. *Experimental Brain Research*, 141 :425–437, 2001. ISSN 0014-4819. doi : 10.1007/s002210100871. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s002210100871>.
- Y. Kunii and H. Hashimoto. Tele-handshake using handshake device. In *Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1995., Proceedings of the 1995 IEEE IECON 21st International Conference on*, volume 1, pages 179–182 vol.1, 1995. doi : 10.1109/IECON.1995.483354.
- T Laliberté, Mathieu Baril, François Guay, and Clément Gosselin. Towards the design of a prosthetic underactuated hand. *Mechanical Sciences*, 1(1) :19–26, 2010.
- Thierry Laliberté and Clément M Gosselin. Simulation and design of underactuated mechanical hands. *Mechanism and machine theory*, 33(1) :39–57, 1998.
- Thierry Laliberté, Lionel Birglen, and Clément Gosselin. Underactuation in robotic grasping hands. *Machine Intelligence & Robotic Control*, 4(3) :1–11, 2002.
- Robert H LaMotte and James Whitehouse. Tactile detection of a dot on a smooth surface : peripheral neural events. *Journal of Neurophysiology*, 56(4) :1109–1128, 1986.
- Alexandre Lecours. *Développement d’algorithmes de commande et d’interfaces mécatroniques pour l’interaction physique humain-robot*. PhD thesis, Université Laval, 2012.
- Alexandre Lecours and Clément Gosselin. Computed-torque control of a four-degree-of-freedom admittance controlled intelligent assist device. In *Experimental Robotics*, pages 635–649. Springer, 2013.
- Alexandre Lecours, Boris Mayer-St-Onge, and Clément Gosselin. Variable admittance control of a four-degree-of-freedom intelligent assist device. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pages 3903–3908. IEEE, 2012.

- Susan J Lederman and Roberta L Klatzky. Haptic perception : A tutorial. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(7) :1439–1459, 2009.
- Jack M Loomis and Susan J Lederman. Tactual perception. *Handbook of perception and human performances*, 2 :2, 1986.
- CS Lovchik and Myron A Diftler. The robonaut hand : A dexterous robot hand for space. In *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 907–912. IEEE, 1999.
- Jenna Lüttgen and Herbert Heuer. The influence of haptic guidance on the production of spatio-temporal patterns. *Human Movement Science*, 31(3) :519 – 528, 2012. ISSN 0167-9457. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.humov.2011.07.002>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167945711001059>.
- B. Massa, S. Roccella, M.C. Carrozza, and P. Dario. Design and development of an underactuated prosthetic hand. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3374–3379 vol.4, 2002. doi : 10.1109/ROBOT.2002.1014232.
- Thomas H Massie and J Kenneth Salisbury. The phantom haptic interface : A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, volume 55, pages 295–300. Chicago, IL, 1994.
- Kevin McGee and Annika Harup. Contact expressions for touching technologies. *Computational Semiotics for Games and New Media*, pages 68–76, 2003.
- Claudio Melchiorri and Gabriele Vassura. Mechanical and control features of the university of bologna hand version 2. In *Intelligent Robots and Systems, 1992., Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 1, pages 187–193. IEEE, 1992.
- AA Melnyk, V Ph Borysenko, and P Henaff. Analysis of synchrony of a handshake between humans. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014 IEEE/ASME International Conference on*, pages 1753–1758. IEEE, 2014.
- J-P Merlet. *Parallel robots*, volume 74. Springer, 2001.
- Ashley Montagu and Floyd W Matson. *The human connection*. McGraw-Hill New York, 1979.

- Daniel Morris, Hong Z Tan, Federico Barbagli, Timothy Chang, and Kenneth Salisbury. Haptic feedback enhances force skill learning. In *WHC*, volume 7, pages 21–26, 2007.
- Florian 'Floyd' Mueller, Frank Vetere, Martin R. Gibbs, Jesper Kjeldskov, Sonja Pedell, and Steve Howard. Hug over a distance. In *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '05, pages 1673–1676, New York, NY, USA, 2005. ACM. ISBN 1-59593-002-7. doi : 10.1145/1056808.1056994. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1056808.1056994>.
- Hoa G Nguyen and John P Bott. Robotics for law enforcement : Applications beyond explosive ordnance disposal. In *Enabling Technologies for Law Enforcement*, pages 433–454. International Society for Optics and Photonics, 2001.
- Shahin S Nudehi, Ranjan Mukherjee, and Moji Ghodoussi. A shared-control approach to haptic interface design for minimally invasive telesurgical training. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 13(4) :588–592, 2005.
- Shannon O'Brien and Florian Mueller. Holding hands over a distance : technology probes in an intimate, mobile context. In *OZCHI '06 : Proceedings of the 18th Australia conference on Computer-Human Interaction*, pages 293–296, New York, NY, USA, 2006. ACM. URL <http://dx.doi.org/10.1145/1228175.1228226>.
- Tokuji Okada. Object-handling system for manual industry. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 9(2) :79–89, 1979.
- Allison M Okamura. Methods for haptic feedback in teleoperated robot-assisted surgery. *Industrial Robot : An International Journal*, 31(6) :499–508, 2004.
- AP Olsson, CR Carignan, and J Tang. Cooperative control of virtual objects using haptic teleoperation over the internet. In *Proceeding of 5th Interantional Conference Disability Virtual Reality*, 2004.
- Chung Hyuk Park, Jae Wook Yoo, and A.M. Howard. Transfer of skills between human operators through haptic training with robot coordination. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 229 –235, may 2010. doi : 10.1109/ROBOT.2010.5509160.
- J.L. Patton and F.A. Mussa-Ivaldi. Robot-assisted adaptive training : custom force fields for teaching movement patterns. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 51(4) :636 –646, april 2004. ISSN 0018-9294. doi : 10.1109/TBME.2003.821035.

- J.L. Pons, E. Rocon, R. Ceres, D. Reynaerts, B. Saro, S. Levin, and W. Van Moorleghem. The manus-hand dextrous robotics upper limb prosthesis : Mechanical and manipulation aspects. *Autonomous Robots*, 16(2) :143–163, 2004. ISSN 0929-5593. doi : 10.1023/B:AURO.0000016862.38337.f1. URL <http://dx.doi.org/10.1023/B%3AAURO.0000016862.38337.f1>.
- Carsten Preusche. Telerobotics. In *Springer handbook of robotics*, pages 741–757. Springer, 2008.
- Abdur Rahman, Abdulmajeed Alkhalidi, Jongeun Cha, Abdulmotaleb El Saddik, et al. Adding haptic feature to youtube. In *Proceedings of the international conference on Multimedia*, pages 1643–1646. ACM, 2010a.
- Abu Saleh Md Mahfujur Rahman, SK Alamgir Hossain, and Abdulmotaleb El Saddik. Bridging the gap between virtual and real world by bringing an interpersonal haptic communication system in second life. In *Multimedia (ISM), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 228–235. IEEE, 2010b.
- K.B. Reed and M.A. Peshkin. Physical collaboration of human-human and human-robot teams. *Haptics, IEEE Transactions on*, 2008.
- K.B. Reed, M. Peshkin, M.J. Hartmann, J. Patton, P.M. Vishton, and M. Grabowecy. Haptic cooperation between people, and between people and machines. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2109–2114, 2006. doi : 10.1109/IROS.2006.282489.
- K.B. Reed, J. Patton, and M. Peshkin. Replicating human-human physical interaction. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pages 3615–3620, 2007. doi : 10.1109/ROBOT.2007.364032.
- Lisa M Register and Tracy B Henley. The phenomenology of intimacy. *Journal of Social and Personal Relationships*, 9(4) :467–481, 1992.
- Ruth Rettie. Connectedness, awareness and social presence. 2003.
- Rethink Robotics. This is a test entry of type @ONLINE, 2014. URL http://sdk.rethinkrobotics.com/wiki/Main_Page.
- AF Rovers and HA Van Essen. Footio—design and evaluation of a device to enable foot interaction over a computer network. In *World Haptics Conference*, pages 521–522. IEEE Computer Society, 2005.

- AF Rovers and Harm A van Essen. Him : a framework for haptic instant messaging. In *CHI'04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 1313–1316. ACM, 2004.
- Loy Rovers and HA Van Essen. Design and evaluation of hapticons for enriched instant messaging. In *Proceedings of EuroHaptics*, volume 4, 2004.
- Teri Rueb, John Wardzala, and Jessica Millstone. Billow : networked hospital playspace for children. In *CHI'97 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 357–358. ACM, 1997.
- Kenneth Salisbury, Francois Conti, and Federico Barbagli. Haptic rendering : introductory concepts. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 24(2) :24–32, 2004.
- Eva-Lotta Sallnas and Shumin Zhai. Collaboration meets fitts' law : Passing virtual objects with and without haptic force feedback. In *INTERACT*, 2003.
- Deborah Schiffrin. Handwork as ceremony : The case of the handshake. *Semiotica*, 12 (3) :189–202, 1974.
- Stefan Schulz, Christian Pylatiuk, and Georg Bretthauer. A new ultralight anthropomorphic hand. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2437–2441. IEEE, 2001.
- Edward A Shanken. Tele-agency : Telematics, telerobotics, and the art of meaning. *Art Journal*, 59(2) :64–77, 2000.
- Thomas B Sheridan. Telerobotics. *Automatica*, 25(4) :487–507, 1989.
- Thomas B Sheridan and William R Ferrell. Remote manipulative control with transmission delay. *Human Factors in Electronics, IEEE Transactions on*, (1) :25–29, 1963.
- Karun B Shimoga. A survey of perceptual feedback issues in dexterous telemanipulation. II. Finger touch feedback. In *Virtual Reality Annual International Symposium, 1993, 1993 IEEE*, pages 271–279. IEEE, 1993.
- Bruno Siciliano and Oussama Khatib. *Springer Handbook of robotics*. Springer, 2008.
- Bruno Siciliano and Luigi Villani. *Robot force control*. Springer, 1999.

- J. Solis, S. Marcheschi, A. Frisoli, C.A. Avizzano, and M. Bergamasco. Reactive robots system : an active human/robot interaction for transferring skill from robot to unskilled persons. *International Advanced Robotics Journal*, 21(3) :267–291, 2007.
- Govindarajan Srimathveeravalli and Kesavadas Thenkurussi. Motor skill training assistance using haptic attributes. In *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, WHC '05, pages 452–457, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society. ISBN 0-7695-2310-2. doi : 10.1109/WHC.2005.96. URL <http://dx.doi.org/10.1109/WHC.2005.96>.
- Mandayam A Srinivasan and Cagatay Basdogan. Haptics in virtual environments : Taxonomy, research status, and challenges. *Computers & Graphics*, 21(4) :393–404, 1997.
- Mandayam A Srinivasan and Robert H LaMotte. Tactile discrimination of shape : responses of slowly and rapidly adapting mechanoreceptive afferents to a step indented into the monkey fingerpad. *The Journal of neuroscience*, 7(6) :1682–1697, 1987.
- R. Strong and B. Feather Gaver. Feather, scent, and shaker : supporting simple intimacy. In *Conference on Computer Supported Cooperative Work*, 1996.
- Toshiyuki Suzuyama, Seiichiro Katsura, and Kiyoshi Ohishi. Decoupled haptic transmission by multilateral control. In *Advanced Motion Control, 2006. 9th IEEE International Workshop on*, pages 334–339. IEEE, 2006.
- Haruo Takemura and Fumio Kishino. Cooperative work environment using virtual workspace. In *Proceedings of the 1992 ACM conference on Computer-supported cooperative work*, pages 226–232. ACM, 1992.
- C.L. Teo, E. Burdet, and H.P. Lim. A robotic teacher of chinese handwriting. In *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2002. HAPTICS 2002. Proceedings. 10th Symposium on*, pages 335–341, 2002. doi : 10.1109/HAPTIC.2002.998977.
- Konrad Tollmar, Stefan Junestrand, and Olle Torgny. Virtually living together. In *Proceedings of the 3rd conference on Designing interactive systems : processes, practices, methods, and techniques*, pages 83–91. ACM, 2000.

- Dzmitry Tsetserukou. Haptihug : A novel haptic display for communication of hug over a distance. In *Haptics : Generating and Perceiving Tangible Sensations*, pages 340–347. Springer, 2010.
- T. Tsumugiwa, R. Yokogawa, and K. Hara. Variable impedance control based on estimation of human arm stiffness for human-robot cooperative calligraphic task. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 644–650 vol.1, 2002. doi : 10.1109/ROBOT.2002.1013431.
- Richard Q Van der Linde, Piet Lammertse, Erwin Frederiksen, and B Ruiter. The hapticmaster, a new high-performance haptic interface. In *Proc. Eurohaptics*, pages 1–5, 2002.
- HA van Essen and AF Rovers. Layered protocols approach to analyze haptic communication over a network. In *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, pages 30–39. IEEE, 2005.
- Nicola Vanello, Daniela Bonino, Emiliano Ricciardi, Mario Tesconi, Enzo Pasquale Scilingo, Valentina Hartwig, Alessandro Tognetti, Giuseppe Zupone, Fabrizio Cutolo, Giulio Giovannetti, et al. Neural correlates of human-robot handshaking. In *ROMAN, 2010 IEEE*, pages 555–561. IEEE, 2010.
- Daniel Wang, Yuru Zhang, and Chong Yao. Stroke-based modeling and haptic skill display for chinese calligraphy simulation system. *Virtual Reality*, 9 :118–132, 2006. ISSN 1359-4338. doi : 10.1007/s10055-005-0012-4. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10055-005-0012-4>.
- Zheng Wang, A. Peer, and M. Buss. An HMM approach to realistic haptic human-robot interaction. In *EuroHaptics conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2009. Third Joint*, pages 374–379, 2009. doi : 10.1109/WHC.2009.4810835.
- John Wright, Frank Hartman, Brian Cooper, Scott Maxwell, Jeng Yen, and Jack Morrison. Driving on mars with rsvp. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 13(2) : 37–45, 2006.
- Guanghui Xie, Mina Jin, Deming Wu, and Minoru Hashimoto. Control for physical human-robot interaction based on online update of dynamics. In *Computer Science*

- and Automation Engineering (CSAE), 2011 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 280–284. IEEE, 2011.
- Yoshihide Yamato, Mitsuru Jindai, and Tomio Watanabe. Development of a shake-motion leading model for human-robot handshaking. In *SICE Annual Conference, 2008*, pages 502–507. IEEE, 2008.
- Y. Yokokohji, R.L. Hollis, T. Kanade, K. Henmi, and T. Yoshikawa. Toward machine mediated training of motor skills. skill transfer from human to human via virtual environment. In *Robot and Human Communication, 1996., 5th IEEE International Workshop on*, pages 32 –37, nov 1996. doi : 10.1109/ROMAN.1996.568646.
- Tsuneo Yoshikawa and Kazuyuki Henmi. Human skill transfer using haptic virtual reality technology. In *Experimental Robotics VI*, volume 250 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, pages 351–360. Springer London, 2000. ISBN 978-1-85233-210-5. doi : 10.1007/BFb0119413. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0119413>.
- Yingzi Zeng, Yanan Li, Pengxuan Xu, and Shuzhi Sam Ge. Human-robot handshaking : a hybrid deliberate/reactive model. In *Social Robotics*, pages 258–267. Springer, 2012.
- Loredana Zollo, Stefano Roccella, Eugenio Guglielmelli, M Chiara Carrozza, and Paolo Dario. Biomechatronic design and control of an anthropomorphic artificial hand for prosthetic and robotic applications. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 12 (4) :418–429, 2007.

Annexe A : Le test JAMAR

Le JAMAR Plus+ est un dynamomètre manuel numérique que nous avons utilisé afin d'obtenir des données significatives sur la poignée de main, et notamment l'intensité de la force échangée lors de cette action. Les informations déduites à l'aide de cet appareil nous servent à bien choisir certaines composantes de l'interface haptique, aussi bien en ce qui concerne le design de la paume réactive que le système d'actionnement des doigts. Le JAMAR Plus+ est illustré sur la figure 2.1.

Un test a été proposé à neuf personnes volontaires. Nous leur avons demandé de saisir l'appareil et de le serrer comme s'ils étaient en train de serrer la main d'une autre personne. Chaque participant répète le test cinq fois. Afin de mieux simuler la sensation d'une poignée de main, une couche de caoutchouc d'emballage recouvre l'appareil en le rendant moins raide au toucher, tel que démontré sur la figure A.1.

Les valeurs de force mesurées sont rassemblées dans le tableau A.1. Afin d'étudier ces

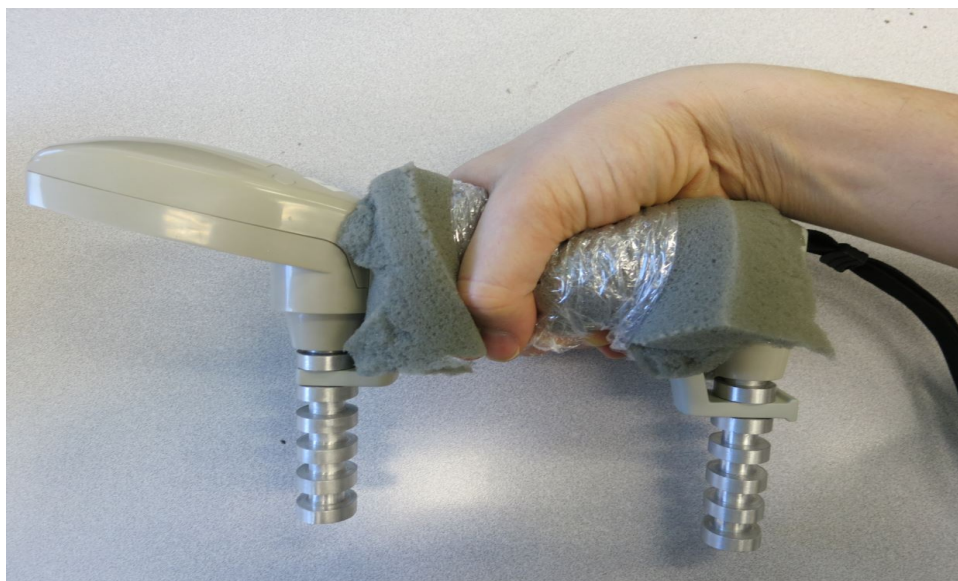


FIGURE A.1 – Le JAMAR recouvert de caoutchouc pour le test.

TABLE A.1 – Valeurs de force de serrage, en Newton, mesurées pendant le test.

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Participant 1	40,1	23,6	49,5	39,7	45,9
Participant 2	53,9	43,2	36,1	33,4	31,2
Participant 3	16,0	28,5	16,5	12,9	26,3
Participant 4	22,7	18,3	15,6	20,1	17,4
Participant 5	21,8	22,7	24,1	32,5	27,6
Participant 6	15,6	5,8	7,1	8,0	7,6
Participant 7	22,3	22,3	28,1	37,9	36,1
Participant 8	8,9	8,4	10,7	11,1	11,1
Participant 9	23,6	31,6	49,5	39,7	25,0

résultats, nous pouvons déduire une fonction de densité de probabilité, telle qu’illustrée sur la figure A.2. La valeur médiane s’avère être d’environ 25 Newton tandis que celle maximale vaut 50 Newton. Nous pouvons observer sur la figure A.2 que les données sont très dispersées par rapport à la valeur médiane. Une dispersion aussi grande décrit ce qui se passe dans la vraie vie : les individus peuvent serrer la main très vigoureusement ou, au contraire, très timidement. La même personne peut aussi le faire de façon différente, du jour au lendemain, selon la situation ou l’interlocuteur. La valeur médiane nous permet d’avoir une valeur de référence de la force que notre interface devrait être capable de reproduire, tandis que la valeur maximale nous donne une idée des forces auxquelles elle devra faire face et auxquelles elle devra résister, dans cette interaction humain-robot.

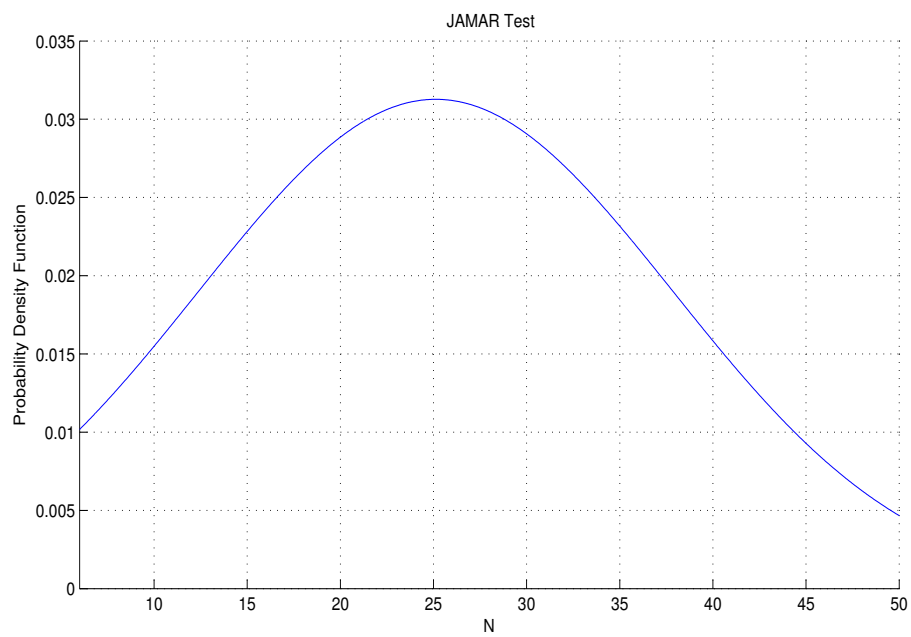


FIGURE A.2 – Densité de probabilité pour l'estimation de la force de serrage lors d'une poignée de main.

Annexe B : Terme de gravité du mécanisme parallèle à cinq barres et deux degrés de liberté et calcul explicite des matrices jacobiennes W_1 et W_2

Dans cette annexe, nous calculons le terme de gravité du dispositif à cinq barres et deux degrés de liberté. Le terme de gravité est nécessaire lorsque le dispositif est monté de façon à ce que l'effecteur se déplace verticalement et non pas horizontalement. Ce terme est calculé comme étant la somme de cinq composantes. Les deux premières, le vecteur \mathbf{G}_1 pour les liens proximaux (notés \mathbf{u}_1 et \mathbf{u}_2 sur la figure 4.2) et le vecteur \mathbf{G}_e pour les tiges aux articulations, sont calculées comme suit :

$$\mathbf{G}_1 = gm_1l_1\mathbf{cos}\boldsymbol{\theta} \quad (28)$$

$$\mathbf{G}_e = gm_eL_1\mathbf{cos}\boldsymbol{\theta} \quad (29)$$

où $\mathbf{cos}\boldsymbol{\theta} = [\cos\theta_1, \cos\theta_2]^T$, g représente l'accélération gravitationnelle, l_1 indique la distance entre le pivot fixe et le centre de masse du lien proximal, dont la masse est représentée par m_1 , L_1 est la longueur du lien proximal et m_e représente la masse de la tige à l'articulation. En revanche, la compensation du terme de gravité pour les deux liens distaux et pour la tige à l'effecteur requiert une approche différente, c'est-à-dire le principe du travail virtuel. Le poids est alors considéré comme une force externe et la force nécessaire à lui résister peut être calculée telle que :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{W}_x^T \mathbf{F}_x, \quad (30)$$

où $\mathbf{F}_x = [0 \quad -m_xg]^T$. \mathbf{W}_x est la matrice jacobienne définie par rapport au vecteur de position du centre de masse de la composante dont on désire calculer le terme

gravitationnel. La tige à l'effecteur et les centres de masse des deux liens distaux ont différents vecteurs de position, qui sont définis respectivement par rapport aux points $P = (x, y)$, $P_1 = (x_1, y_1)$ et $P_2 = (x_2, y_2)$. Il faut dès lors expliciter les trois différentes matrices jacobiniennes. Le terme de gravité sera alors écrit tel que :

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_e + \mathbf{W}_1^T \mathbf{F}_2 + \mathbf{W}_2^T \mathbf{F}_2 + \mathbf{W}^T \mathbf{F}_{ee} \quad (31)$$

où les termes \mathbf{G}_1 et \mathbf{G}_e sont les vecteurs définis aux équations 28 et 29, $\mathbf{F}_2 = [0 \quad -m_2g]^T$ et $\mathbf{F}_{ee} = [0 \quad -m_{ee}g]^T$. m_2 représente la masse des liens distaux (notés \mathbf{v}_1 et \mathbf{v}_2 sur la figure 4.2) et m_{ee} représente la masse de l'effecteur.

La matrice \mathbf{W} a été calculée à la section 4.2.2, tandis que le calcul explicite de \mathbf{W}_1 et \mathbf{W}_2 est illustré dans la suite de cette annexe.

Nous allons maintenant calculer les matrices \mathbf{W}_1 et \mathbf{W}_2 , lesquelles sont nécessaires pour le terme de gravité. En commençant avec les matrices \mathbf{K}_1 et \mathbf{J}_1 , définies par rapport au point P_1 , nous écrivons :

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1 &= \mathbf{n}_1 + \mathbf{u}_1 + l_2 \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{p}_1 &= \mathbf{n}_2 + \mathbf{u}_2 + \mathbf{v}_2 - (L_2 - l_2) \mathbf{w}_1. \end{aligned} \quad (32)$$

En écrivant $\mathbf{w}_1 = \frac{1}{l_2}(\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)$ et en le remplaçant dans la deuxième ligne de l'équation (32), nous obtenons :

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{n}_2 + \mathbf{u}_2 + \mathbf{v}_2 - \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2}\right)(\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1), \quad (33)$$

ce qui peut être réécrit :

$$\left(\frac{L_2}{l_2}\right)\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_2 - \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2}\right)\mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_2 - \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2}\right)\mathbf{u}_1 = \mathbf{v}_2. \quad (34)$$

L'équation (32) peut maintenant être écrite comme suit :

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1 &= l_2 \mathbf{w}_1 \\ \frac{L_2}{l_2} \mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_2 - \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2}\right)\mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_2 - \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2}\right)\mathbf{u}_1 &= \mathbf{v}_2 \end{aligned} \quad (35)$$

et ensuite nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned} (\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T (\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1) &= l_2^2 \\ \left(\left(\frac{L_2}{l_2}\right)\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_2 - \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2}\right)\mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_2 - \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2}\right)\mathbf{u}_1\right)^T \left(\frac{L_2}{l_2}\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2\right) &= L_2^2, \end{aligned} \quad (36)$$

où :

$$\begin{aligned}\mathbf{n}_{12} &= \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2}\right)\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2, \\ \mathbf{u}_{12} &= \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2}\right)\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2.\end{aligned}\tag{37}$$

La dérivation par rapport au temps de l'équation (36) nous donne :

$$\begin{aligned}(\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T(\dot{\mathbf{p}}_1 - \dot{\mathbf{u}}_1) &= 0 \\ \left(\frac{L_2}{l_2}\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_{12} - \mathbf{u}_{12}\right)^T \left(\frac{L_2}{l_2}\dot{\mathbf{p}}_1 - \dot{\mathbf{u}}_{12}\right) &= 0,\end{aligned}\tag{38}$$

et donc

$$\begin{aligned}(\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T \dot{\mathbf{p}}_1 &= (\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T \dot{\mathbf{u}}_1 \\ \left(\frac{L_2}{l_2}\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_{12} - \mathbf{u}_{12}\right)^T \frac{L_2}{l_2} \dot{\mathbf{p}}_1 &= \\ \left(\frac{L_2}{l_2}\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_{12} - \mathbf{u}_{12}\right)^T \left(\left(\frac{L_2 - l_2}{l_2}\right)\dot{\mathbf{u}}_1 + \dot{\mathbf{u}}_2\right).\end{aligned}\tag{39}$$

Finalement les matrices jacobiennes s'écrivent

$$\mathbf{J}_1 = \begin{bmatrix} (\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T \\ \frac{L_2}{l_2} \left(\frac{L_2}{l_2}\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_{12} - \mathbf{u}_{12}\right)^T \end{bmatrix}\tag{40}$$

et

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} K_{1,11} & K_{1,12} \\ K_{1,21} & K_{1,22} \end{bmatrix}\tag{41}$$

où

$$\begin{aligned}K_{1,11} &= (\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_1 - \mathbf{u}_1)^T \mathbf{E}\mathbf{u}_1 \\ K_{1,12} &= 0 \\ K_{1,21} &= \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2}\right) \left(\frac{L_2}{l_2}\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_{12} - \mathbf{u}_{12}\right)^T \mathbf{E}\mathbf{u}_1 \\ K_{1,22} &= \left(\frac{L_2}{l_2}\mathbf{p}_1 - \mathbf{n}_{12} - \mathbf{u}_{12}\right)^T \mathbf{E}\mathbf{u}_2.\end{aligned}\tag{42}$$

Pour les matrices \mathbf{J}_2 and \mathbf{K}_2 la démarche à suivre est la même. Les équations de position pour le point P_2 sont :

$$\begin{aligned}\mathbf{p}_2 &= \mathbf{n}_1 + \mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_1 - (L_2 - l_2)\mathbf{w}_2 \\ \mathbf{p}_2 &= \mathbf{n}_2 + \mathbf{u}_2 + l_2\mathbf{w}_2.\end{aligned}\tag{43}$$

En suivant la même approche utilisée pour \mathbf{w}_2 , nous pouvons obtenir \mathbf{w}_2 à partir de la deuxième ligne de l'équation (43) et la remplacer dans la première ligne, laquelle est

réécrite comme dans l'équation (34). Ensuite, tel que nous l'avons fait pour l'équation (35), nous pouvons résoudre pour \mathbf{w}_2 et \mathbf{v}_1 , ensuite élever au carré et dériver. Finalement, on obtient les matrices jacobiniennes suivantes :

$$\mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} (\mathbf{p}_2 - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2)^T \\ \frac{L_2}{l_2} \left(\frac{L_2}{l_2} \mathbf{p}_2 - \mathbf{n}_{21} - \mathbf{u}_{21} \right)^T \end{bmatrix} \quad (44)$$

et

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} K_{2,11} & K_{2,12} \\ K_{2,21} & K_{2,22} \end{bmatrix} \quad (45)$$

où

$$\begin{aligned} K_{2,11} &= 0 \\ K_{2,12} &= (\mathbf{p}_2 - \mathbf{n}_2 - \mathbf{u}_2)^T \mathbf{E} \mathbf{u}_2 \\ K_{2,21} &= \left(\frac{L_2}{l_2} \mathbf{p}_2 - \mathbf{n}_{21} - \mathbf{u}_{21} \right)^T \mathbf{E} \mathbf{u}_1 \\ K_{2,22} &= \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2} \right) \left(\frac{L_2}{l_2} \mathbf{p}_2 - \mathbf{n}_{21} - \mathbf{u}_{21} \right)^T \mathbf{E} \mathbf{u}_2 \end{aligned} \quad (46)$$

et

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{21} &= \mathbf{n}_1 + \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2} \right) \mathbf{n}_2, \\ \mathbf{u}_{21} &= \mathbf{u}_1 + \left(\frac{L_2 - l_2}{l_2} \right) \mathbf{u}_2. \end{aligned} \quad (47)$$