

Table des matières

Résumé	v
Remerciements	vi
1 Introduction générale	1
2 État de l’art et contributions	5
2.1 Introduction	5
2.2 Contexte	6
2.3 Caractéristiques du mouvement des mains et doigts	7
2.4 État de l’art des interfaces haptiques manuelles dextres	9
2.4.1 Exosquelettes haptiques	10
2.4.2 Interfaces dextres permettant un retour haptique sur les phalanges distales uniquement	14
2.4.3 Bilan de la revue des interfaces manuelles dextres	18
2.5 Le contact intermittent	19
2.5.1 Interfaces Encountered-type	19
2.5.2 Interfaces Encounter-type	22
2.5.3 Bilan de la revue des interfaces à contacts intermittents	25
2.6 Problématique et contributions de la thèse	26
3 Conception d’un effecteur de robot pour le contact intermittent	29
3.1 Introduction	29
3.2 Dimensionnement de l’anneau	30
3.2.1 Modélisation de la cible	30
3.2.2 Modèle de l’interface	31
3.2.3 Simulation du suivi d’un doigt	31
3.3 Conception de l’effecteur	33
3.3.1 Sélection d’une technologie pour la mesure de distance entre le doigt et l’anneau	33
3.3.2 Conception mécanique	34
3.3.3 Conception de l’électronique et des communications	36
3.4 Caractérisation expérimentale	37
3.4.1 Modélisation du fonctionnement d’un capteur	38
3.4.2 Réflectance de la cible	39
3.5 Calibration et validation de l’anneau	44

3.5.1	Calibration de l'anneau	44
3.5.2	Validation de l'instrumentation	45
3.5.3	Bilan et performances de l'anneau	49
3.6	Utilisation de l'effecteur pour le contact intermittent	51
3.6.1	Modélisation du contour d'un doigt	51
3.6.2	Filtrage dynamique	56
3.6.3	Communication avec le contrôleur	58
3.6.4	Influence du nombre de capteurs sur l'estimation de la géométrie du doigt	59
3.6.5	Transposition des résultats à trois dimensions	60
3.7	Conclusion et perspectives	61
4	Commande d'un dispositif à contacts intermittents	65
4.1	Introduction	65
4.2	Infrastructure expérimentale	66
4.2.1	Description du robot et estimation de la position du doigt	66
4.2.2	Tâche de réalité virtuelle	68
4.3	Analyse des principaux modes de fonctionnement	69
4.3.1	Suivi de position en espace libre	69
4.3.2	Restitution d'effort au contact	73
4.4	Gestion de la transition entre espace libre et contact	76
4.4.1	État de l'art : transition par bascule simple	76
4.4.2	Loi de commande sans bascule	84
4.4.3	Loi de commande avec transition continue	87
4.4.4	Conclusion	96
4.5	Tests utilisateurs	97
4.5.1	Protocole	97
4.5.2	Résultats et discussion	100
4.5.3	Conclusion	103
4.6	Conclusion	104
5	Choix des zones de la main à considérer pour la conception d'une interface dextre	107
5.1	Introduction	107
5.2	Analyse des zones de contact de la main : construction d'une carte des interactions manuelles	108
5.2.1	Manipulation	108
5.2.2	Exploration	114
5.2.3	Carte d'interaction globale	116
5.2.4	Système sensoriel de la peau glabre	118
5.3	Analyse des capacités manuelles : construction d'un arbre d'interactions	120
5.3.1	Arbre d'interactions général	120
5.3.2	Amputations de la main	123
5.4	Application à l'évaluation des capacités des interfaces haptiques	124
5.4.1	Critères de performance des interfaces haptiques	126
5.4.2	Revue de quelques interfaces haptiques dextres	127
5.4.3	Préconisations pour la conception des interfaces haptiques	130
5.5	Conclusions	133

6 Conclusion générale	135
Bibliographie	139
Liste des publications	149

Chapitre 1

Introduction générale

Les interfaces haptiques sont des périphériques permettant de restituer des contacts à un opérateur lors d'une interaction avec un environnement distant (voir figure 1.1) ou virtuel (voir figure 1.2). La plupart sont constitués d'une structure série ou parallèle, terminée par une poignée que l'utilisateur déplace pour interagir avec l'environnement.

Lorsqu'il s'agit d'implémenter des interactions manuelles fines, les interfaces haptiques à poignée ne suffisent plus. Des interfaces dextres, présentant plusieurs organes terminaux qui fournissent un retour haptique au niveau des doigts, sont alors utilisées. Elles ont cependant des structures complexes, un poids et un encombrement qui excluent toute possibilité pour l'utilisateur de réaliser la tâche de façon naturelle.

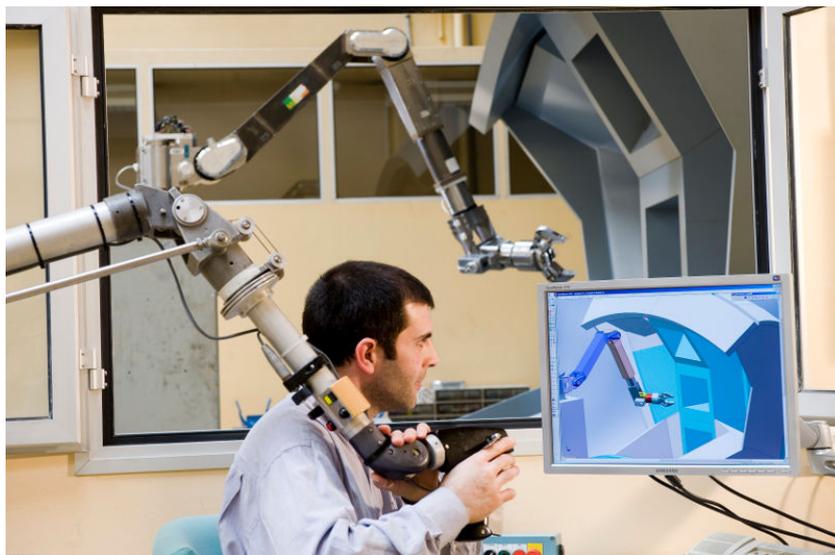


FIGURE 1.1: Bras maître de téléopération à retour d'effort dans un contexte nucléaire.
© CEA/Stropha

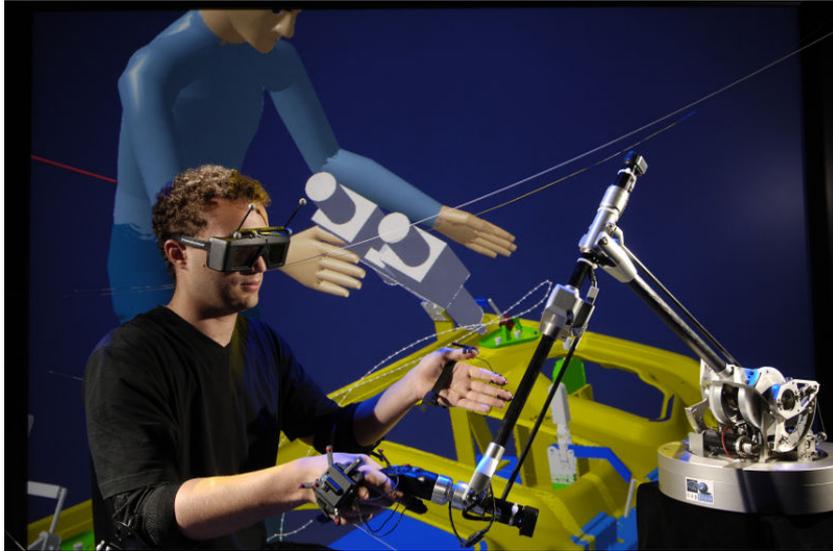


FIGURE 1.2: Essai de montabilité pour l'automobile. © CEA/Stroppa

Pendant l'évolution en espace libre, c'est à dire en l'absence d'interaction avec l'environnement, l'interface doit être la plus transparente possible. Au contraire, au contact de l'environnement, elle peut être amenée à restituer des efforts et une raideur importants. Ces deux impératifs sont opposés en termes de choix de matériaux, de transmission et de technologie d'actionnement. Plusieurs travaux ont été dédiés à la recherche de compromis satisfaisants entre ces deux exigences, tant en conception mécanique qu'en architectures de commande.

Le concept des interfaces haptiques à contacts intermittents est une solution originale à ce problème. Il consiste à commander le robot pour qu'il suive les mouvements de l'utilisateur à distance et ne vienne à son contact que lorsque des efforts doivent lui être restitués. Quelques implémentations de ce concept existent à ce jour. Cependant, aucune ne permet d'interagir de manière naturelle avec l'environnement.

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons quelques contributions pour l'élaboration d'une interface dextre à contacts intermittents. Nous nous intéressons en premier lieu à la conception d'un effecteur adapté au contact intermittent pour un doigt. Celui-ci est attaché à l'extrémité d'une interface haptique. Cela nous permet, dans un deuxième temps, de proposer des lois de commande adaptées à ce dispositif, afin qu'il suive le doigt en espace libre et lui restitue efficacement les efforts au contact. Enfin, afin d'étendre ces résultats dans le cas d'une interface plus générique, nous nous intéressons au choix des zones de contact de la main à prendre en compte dans la conception d'interfaces dextres. Le manuscrit est ainsi organisé en quatre chapitres :

État de l'art et contributions : Nous présentons tout d'abord le contexte de notre recherche. Les performances humaines en termes de manipulation qui doivent être adressées par une interface haptique générique sont passées en revue. Un état de l'art des interfaces permettant d'interagir avec une simulation directement avec les doigts est ensuite dressé. Le principe de

contact intermittent est détaillé, et ses implémentations sont rassemblées. La problématique et les contributions de la thèse sont enfin présentées.

Conception d'un effecteur de robot pour le contact intermittent : La revue des performances humaines est utilisée pour constituer le cahier des charges d'un effecteur adapté au contact intermittent digital dans un plan. Un capteur adapté est ensuite sélectionné, et l'effecteur est conçu sous la forme d'un anneau. Nous effectuons sa caractérisation et sa calibration afin qu'il fournisse une estimation fiable de la position du centre du doigt, et reconstruise précisément la géométrie de son contour. Les travaux réalisés sont finalement utilisés pour décrire des perspectives sur la conception d'un effecteur adapté au suivi à distance d'un doigt dans toutes les directions de l'espace.

Commande d'un dispositif à contacts intermittents : L'effecteur est attaché à l'extrémité d'un robot deux axes. Nous commençons par analyser séparément les deux principaux modes de commande à considérer : d'une part le suivi de position en espace libre, d'autre part la restitution d'efforts au contact. La transition entre ces deux modes est ensuite analysée, d'une part à partir de la loi de commande proposée par la littérature, d'autre part par l'élaboration d'une nouvelle loi permettant de s'affranchir de l'estimation de la géométrie du doigt. Finalement, nous comparons la capacité de dix utilisateurs à détecter un contact, avec l'interface à contacts intermittents puis avec une interface haptique classique en contact permanent avec le doigt.

Choix des zones de contact pour une interface haptique dextre : Nous nous intéressons à l'extension des résultats pour un doigt à une interface plus générique. La main est d'abord divisée en plusieurs zones de contact en fonction des taxonomies de manipulation et d'exploration existantes. Ces surfaces sont ensuite pondérées par leur fréquence d'utilisation. Les résultats sont finalement rassemblés dans des cartes d'interaction, puis réarrangés dans un arbre d'interaction quantifiant les interactions possibles des zones de contact considérées. Les interfaces haptiques génériques, introduites dans l'état de l'art, sont enfin classées en fonction de leur complexité et des possibilités d'interaction qu'elles offrent.

Enfin, en conclusion, nous faisons le bilan des travaux réalisés et nous proposons des perspectives quant à l'approche adoptée.

Chapitre 2

État de l'art et contributions

2.1 Introduction

Les interfaces haptiques sont des périphériques permettant à un utilisateur d'interagir avec un environnement virtuel par le sens du toucher. La plupart d'entre elles se présentent sous la forme d'une structure série ou parallèle, terminée par une poignée saisie en main par l'utilisateur pendant toute la simulation. Il la déplace dans l'espace et ressent par son intermédiaire les efforts résultant de ses interactions avec l'environnement. De telles interfaces sont adaptées à des situations où l'on manipule un outil. Cependant, elles ne conviennent pas si l'on veut simuler des interactions avec tous types d'outils ou à mains nues.

Les interfaces appropriées sont alors les interfaces dites génériques ou dextres. Dans la littérature, ces interfaces ont des structures mécaniques plus complexes, dont les frottements notamment peuvent constituer un obstacle à l'immersion de l'utilisateur dans la simulation. Les techniques d'actionnement, de conception mécanique et de commande permettant de minimiser leur influence, mais pas de les compenser totalement. Dès lors, il est nécessaire d'utiliser des approches différentes. Le principe de contact intermittent propose de déconnecter le robot de l'utilisateur lorsqu'aucun effort ne doit lui être restitué. Il paraît adapté à cette problématique.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord le contexte de notre étude. Puis les performances humaines qui doivent être adressées par une interface haptique générique sont brièvement énoncées. Nous nous intéressons ensuite à l'état de l'art des interfaces conçues pour une interaction à plusieurs doigts avec un environnement virtuel. Le principe de contact intermittent et ses différentes implémentations sont ensuite détaillées. La problématique et les contributions de la thèse sont enfin énoncées.

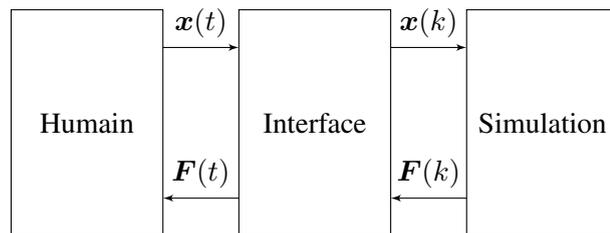


FIGURE 2.1: Principe de base d'une simulation haptique (adapté de (SALISBURY, CONTI et BARBAGLI 2004) et (ADAMS et HANNAFORD 1998)). $x(t)$ et $F(t)$ représentent les position et force continues échangées entre l'utilisateur et l'interface. $x(k)$ et $F(k)$ sont les informations correspondantes échangées en temps discret entre l'interface et la simulation.

2.2 Contexte

Contrairement aux autres sens, le toucher permet à la fois d'acquérir de l'information et d'agir sur l'environnement (JONES et LEDERMAN 2006). Une interface haptique a pour rôle de stimuler ce sens lors d'interactions avec des environnements distants ou virtuels (HAYWARD et al. 2004). Pour cela, elle mesure d'abord les mouvements ou les efforts de l'utilisateur, et les transmet à la simulation (figure 2.1). Cette dernière en déduit ensuite les efforts ou les mouvement résultant de l'interaction avec la simulation et commande l'interface en conséquence. Cette dernière est utilisée pour appliquer ces efforts ou déplacements sur l'utilisateur (ADAMS et HANNAFORD 1998). Ainsi, une interface haptique se présente comme un périphérique à la fois d'entrée et de sortie, car le flux d'informations qui la traverse est bidirectionnel (ADAMS et HANNAFORD 1999) : elle échange de l'énergie avec l'utilisateur à travers leur liaison mécanique.

Les applications des interfaces haptiques sont nombreuses (HAYWARD et al. 2004). Elles peuvent être utilisées en téléopération nucléaire, spatiale ou chirurgicale (GOSSELIN, BIDARD et BRISSET 2005), mais aussi en Réalité Virtuelle dans des domaines aussi variés que le jeu vidéo (MARTIN et HILLIER 2009), l'art (BERGAMASCO, FRISOLI et BARBAGLI 2002), la supervision en salle de contrôle (FUCHS, MOREAU et GUITTON 2011, section 6.2), la rééducation (LOUREIRO et HARWIN 2007), l'éducation (GOSSELIN et al. 2005), l'entraînement au geste chirurgical, l'ingénierie (BURDEA 1999) ou encore l'étude du toucher (PRATTICIZZO, PACCHIEROTTI et ROSATI 2012).

Dans cette thèse, nous nous concentrons sur les interactions en environnement virtuel et nous nous intéressons plus spécifiquement à la manipulation fine d'objets virtuels. Les interfaces ont pour but d'offrir à l'utilisateur l'interaction la plus réaliste possible avec l'environnement virtuel. Cela suppose l'utilisation d'interfaces dextres afin de permettre les interactions les plus génériques possibles, et l'exploitation du principe de contact intermittent afin de rendre ces interactions les plus réalistes possibles. L'association de ces deux principes, qui sont étudiés ci-dessous, doit permettre d'améliorer l'utilité de telles interfaces. Ainsi, par exemple dans le

cas de la formation de chirurgiens à des opérations rares et potentiellement dangereuses pour le patient, ceux-ci seront plus efficaces si les gestes chirurgicaux qu'ils ont appris à faire en simulation se transposent tels quels dans la réalité (VAN ADRICHEM 2009).

2.3 Caractéristiques du mouvement des mains et doigts

Une interface haptique manuelle doit avoir des capacités et une dynamique compatibles avec le mouvement des mains et doigts d'un opérateur, pour lui permettre d'interagir naturellement avec un environnement virtuel. La littérature sur ce sujet est abondante dans les domaines de la robotique et de la psychologie (BROOKS 1990 ; GOSSELIN 2000, 2012 ; JAKOBSON et GOODALE 1991 ; JONES 1997 ; JONES et LEDERMAN 2006 ; KUNESCH, BINKOFSKI et FREUND 1989 ; NAGASAKI 1989 ; SAMUR 2012 ; SHIMOGA 1993a,b). Elle est cependant moins documentée pour les vitesses et accélérations des membres les uns par rapport aux autres. Nous avons donc également analysé la littérature s'intéressant à l'étude des gestes sportifs et techniques pour en extraire d'abord les vitesses et accélérations moyennes et maximales de la main par rapport au sol, puis des doigts par rapport à la main, dans un cas le plus général possible (BAKER et al. 2007 ; COLE et ABBS 1986 ; DUN et al. 2007 ; ELGENDI, PICON et MAGNENAT-THALMANN 2012 ; FLEISIG et al. 1999 ; FURUYA, FLANDERS et SOECHTING 2011 ; GRINYAGIN, BIRYUKOVA et MAIER 2005 ; HIRASHIMA et al. 2008 ; JAKOBSON et GOODALE 1991 ; NAGASAKI 1989 ; NETO et al. 2012 ; SANCHO-BRU et al. 2001 ; SOMMERICH, MARRAS et PARNIANPOUR 1996 ; WELCH et al. 1995 ; ZAREMSKI et KRABAK 2012).

Le tableau 2.1 regroupe les données disponibles dans la littérature sur le mouvement des mains par rapport au sol. Les mouvements sportifs impliquant tout le corps, comme les lancers de balles de baseball, peuvent être considérés comme les mouvements les plus dynamiques. Ils peuvent être dangereux s'ils sont mal exécutés et sont donc à éviter. D'autres sports impliquant des mouvements coordonnés de plusieurs articulations comme le kung-fu fournissent des valeurs d'accélération et vitesse moins élevées. Dans l'étude des mouvements du bras en réalité virtuelle ou des déplacements du coude en environnement maîtrisé, les accélérations et vitesses sont similaires et peuvent servir de références maximales : 4,6 à 5,8 m/s, pour 70 à 95,1 m/s². Les mouvements qualifiés de "normaux" ou "rapides" sont choisis comme références pour les vitesses et accélérations moyennes des mains : 1,41 à 1,86 m/s, pour 22 m/s².

Une étude spécifique a été effectuée pour les doigts dans leur mouvement par rapport à la paume. Dans le tableau 2.2, les mouvements rapides, impliquant des mouvements de doigts dynamiques comme lorsqu'on joue du piano, sont distingués des mouvements normaux comme la frappe au clavier. Les données rassemblées montrent que les vitesses et accélérations dépendent largement du doigt utilisé (pouce ou autre doigt) et de la direction du mouvement (flexion-extension ou

abduction-adduction). Les normes des vitesses et accélérations des mouvements rapides ont été choisies comme références :

- Flexion-extension du pouce : 0,14 – 0,21 m/s ($6,75 \text{ m/s}^2$);
- Abduction-adduction du pouce : 0,62 m/s (n/a);
- Flexion-extension d'un doigt : 1,01 – 1,26 m/s ($24,5 \text{ m/s}^2$);
- Abduction-adduction d'un doigt : 0,26 m/s (4 m/s^2).

Quelques autres données sur les performances de la main humaine utiles pour le dimensionnement des interfaces haptiques sont regroupées dans le tableau 2.3. Elles sont concaténées avec les conclusions de cette courte revue des vitesses et accélérations à prendre en compte dans la

TABLEAU 2.1: Vitesses et accélérations de la main par rapport au sol dans les domaines du sport, des études physiologiques et de la réalité virtuelle.

Type de mouvement	Référence	Membres impliqués	Vitesse max (m/s)	Commentaire
Lancers de baseball	DUN et al. 2007 ; FLEISIG et al. 1999, HIRASHIMA et al. 2008 ; ZAREMSKI et KRABAK 2012	Corps entier	28.1 to 44.7	Vitesse maximale (dangereuse)
Frappes de balle de baseball	WELCH et al. 1995	Corps entier	17	Vitesse maximale
Coups de kung-fu	NETO et al. 2012	Bras entier	5.24 to 5.82	Vitesse maximale
Mouvements libres en réalité virtuelle	ELGENDI, PICON et MAGNENAT-THALMANN 2012	Bras entier	4.6	Vitesse maximale
Mouvements contraints	NAGASAKI 1989	Coude	5.78	Vitesse maximale
Mouvements libres en réalité virtuelle	ELGENDI, PICON et MAGNENAT-THALMANN 2012	Bras entier	1.6	Vitesse moyenne
Mouvements de prise	JAKOBSON et GOODALE 1991	Bras entier	1.41	Vitesse moyenne
Mouvements contraints	NAGASAKI 1989	Coude	1.86	Vitesse moyenne

TABLEAU 2.2: Vitesses et accélérations des doigts par rapport à la paume de la main dans différents domaines (les éventuelles informations angulaires ont été traduites en termes de vitesses et accélérations cartésiennes en utilisant les données moyennes des longueurs des phalanges indiquées dans (GREINER 1991)).

Type de mouvement	Référence	Vitesse max (m/s)	Accél. Max (m/s^2)	Commentaire
Pouce abd.-add.	(FURUYA, FLANDERS et SOECHTING 2011)	0,62		Piano, rapide
Pouce flex.-ext.	(COLE et ABBS 1986 ; FURUYA, FLANDERS et SOECHTING 2011 ; GRINYAGIN, BIRYUKOVA et MAIER 2005)	0,14 à 0,21	6,75	Piano et expérimentations contraintes en laboratoire, rapide
Doigts abd.-add.	(SANCHO-BRU et al. 2001)	0,26	4	Expérimentations contraintes en laboratoire, rapide
Doigts flex.-ext.	(COLE et ABBS 1986 ; FURUYA, FLANDERS et SOECHTING 2011 ; SANCHO-BRU et al. 2001)	1,01 à 1,26	24,5	Piano et expérimentations contraintes en laboratoire, rapide
Pouce abd.-add.	(BAKER et al. 2007)	0,03 à 0,06	0,37 à 0,97	Clavier, normal
Pouce flex.-ext.	(BAKER et al. 2007 ; GRINYAGIN, BIRYUKOVA et MAIER 2005)	0,04 à 0,07	0,6 à 1,17	Clavier et expérimentations contraintes en laboratoire, normal
Doigts abd.-add.	(BAKER et al. 2007)	0,02 à 0,03	0,54 à 0,86	Clavier, normal
Doigts flex.-ext.	(BAKER et al. 2007 ; GRINYAGIN, BIRYUKOVA et MAIER 2005 ; SOMMERICH, MARRAS et PARNIANPOUR 1996)	0,05 à 0,29	0,73 à 4	Clavier et expérimentations contraintes en laboratoire, normal

TABLEAU 2.3: Résumé des performances de la main humaine qui doivent être prises en compte dans la conception d'une interface haptique générique pour des tâches habituellement simulées en réalité virtuelle.

Plus petit déplacement détectable par de la peau statique	11,2 μm
Résolution de position d'un doigt	0,1°
Intervalle d'orientations de l'extrémité d'un doigt	260°
Discrimination d'effort	0,06 N
Force pendant la manipulation	crête 40 N continu 10 N
Mouvement de la main	Vitesse 1,41 à 1,86 m/s Accélération 22 m/s^2
Pouce abduction-adduction	Vitesse 0,62 m/s
Pouce flexion-extension	Vitesse 0,14 à 0,21 m/s Accélération 6,75 m/s^2
Doigt abduction-adduction	Vitesse 0,26 m/s Accélération 4 m/s^2
Doigt flexion-extension	Vitesse 1,01 à 1,26 m/s Accélération 24,5 m/s^2
Fréquence du mouvement	4 à 7 Hz
Bande passante sensorielle	320 Hz

conception d'une interface manuelle. Une liste plus complète de ces caractéristiques est disponible dans (SAMUR 2012).

2.4 État de l'art des interfaces haptiques manuelles dextres

La plupart des interfaces haptiques permettent une interaction avec une simulation par l'intermédiaire d'une poignée (GRANGE et al. 2001 ; MARTIN et HILLIER 2009 ; MASSIE et SALISBURY 1994 ; VAN DER LINDE et al. 2002). Celle-ci n'a lieu qu'à travers un unique corps mobile. Cette caractéristique permet un usage assez général (SAMUR 2012). Cependant, elles ne permettent une manipulation naturelle, c'est-à-dire conforme aux mouvements que l'utilisateur effectuerait dans la réalité pour exécuter la même tâche, qu'à travers un outil. L'expérience utilisateur n'est plus immersive (SHERIDAN 1992) lorsque l'on souhaite manipuler librement tout type d'objet, ce qui est habituellement effectué avec les mains (GOSSELIN et al. 2005). Au contraire, les interfaces manuelles dextres permettent une interaction naturelle avec la main et les doigts.

Nous présentons ci-dessous un état de l'art des interfaces haptiques dextres. Plusieurs classifications sont possibles :

- (FOUMASHI, TRONCOSSI et PARENTI CASTELLI 2011) proposent une classification des interfaces dextres à partir de leur application : exosquelettes pour la rééducation, systèmes d'assistance au geste et interfaces pour l'interaction en environnement virtuel et téléopération ;
- (FONTANA et al. 2009) proposent une classification des interfaces de type exosquelette en fonction du nombre de phalanges sur lesquelles un retour d'effort est proposé, et sur leur similarité morphologique avec la cinématique des doigts ;
- (GOSSELIN 2012) propose plusieurs classifications possibles des interfaces manuelles :

- en fonction de leur point d'attache, sur une base (fixe ou mobile) ou directement portée par l'utilisateur ;
- en fonction du retour d'effort qu'elles permettent, sur plusieurs phalanges ou uniquement la phalange distale (également proposé par (SUN, MIAO et LI 2009)) ;
- en fonction du nombre de doigts considérés dans la conception ;
- en fonction de leur cinématique, couplée ou non ;
- en fonction du nombre de degrés de liberté contrôlés par doigt ;
- selon que les actionneurs sont à proximité ou déportés ;
- selon que le retour d'effort est seulement kinesthésique, ou kinesthésique et tactile.

Nous nous intéressons ici uniquement aux interfaces conçues pour la manipulation d'objets virtuels mais nous prenons aussi en compte dans cet état de l'art les interfaces pour la téléopération qui sont technologiquement très semblables. Nous distinguons les interfaces permettant un retour d'effort sur l'ensemble des phalanges des interfaces uniquement liées mécaniquement aux phalanges distales, puis nous les classifions en fonction du nombre de doigts pris en compte.

2.4.1 Exosquelettes haptiques

Le développement des exosquelettes haptiques a débuté avec celui des interfaces dextres de télémanipulation. Ces dernières ont été imaginées pour commander des mains robotiques de manière plus naturelle (BURDEA et SPEETER 1989 ; BURDEA et ZHUANG 1991 ; TURKI et COIFFET 1995). Dans le contexte de la manipulation fine, elles doivent être les plus transparentes possible. Cela représente un défi technologique (GOSSELIN 2012 ; KOYAMA et al. 2002). Le poids, l'encombrement et l'espace de travail sont également des facteurs critiques pour la conception de tels dispositifs, afin que l'utilisateur puisse faire abstraction du robot pour se concentrer sur la tâche à effectuer.

- L'étude A de l'université de Delft (figure 2.2) en vue de la conception d'un exosquelette à cinq doigts se présente comme un robot à trois modules fixés séparément sur les phalanges, qui glissent les uns par rapport aux autres (LELIEVELD, MAENO et TOMIYAMA 2006). Un moteur par module contrôle la tension du câble qui lui est attaché. Le retour d'effort est donc bidirectionnel sur chaque phalange, dans la direction normale à son attache, de manière couplée. Il est géré par le câble en flexion, et par des ressorts de rappel aux raideurs suffisantes en extension. L'utilisation d'un étage de réduction permet une résolution articulaire de $0,02^\circ$ au niveau de chaque liaison. La cinématique de l'interface la rend sensible aux frottements (force de friction : jusqu'à 3,87 N). Les actionneurs sont déportés à proximité de la main.
- L'étude B de l'université de Delft (figure 2.3) en vue de la conception d'un exosquelette à cinq doigts se présente comme un robot à trois modules fixés séparément sur les phalanges, qui glissent les uns par rapport aux autres (LELIEVELD, MAENO et TOMIYAMA 2006) . Un moteur par module est relié à un câble contrôlant un système de freinage passif. Il permet

d'appliquer un effort jusqu'à 2 N sur chaque phalange de l'utilisateur. Grâce à l'utilisation d'un étage de réduction, la résolution articulaire est de $0,12^\circ$ au niveau de chaque liaison. Cet exosquelette pèse 60 g. Les actionneurs sont déportés à proximité de la main.

- L'exosquelette SKK Hand master II (figure 2.4) est un exosquelette haptique à deux doigts (pouce-index) (CHOI et CHOI 1999). La structure adaptée à l'index comporte quatre degrés de liberté, tandis que celle pour le pouce en a trois. Chaque liaison est pilotée par un moteur ultrasonique placé directement au niveau de celle-ci. Cela permet un encombrement réduit, une structure mécanique simple et un retour d'effort bidirectionnel, pour un poids contenu.
- L'exosquelette SARCOS (figure 2.5) est un bras maître pouvant appliquer des efforts à la fois sur le pouce, l'index et le bras d'un utilisateur. Il est basé sur une architecture série et doit

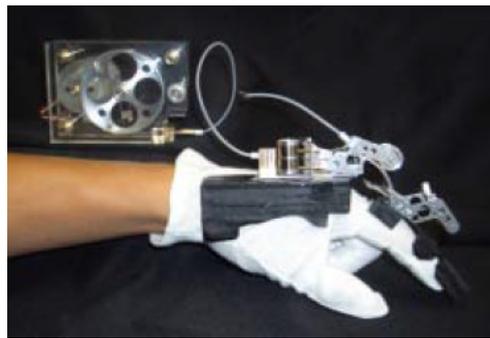


FIGURE 2.2: Exosquelette de l'université de Delft (Étude A) (LELIEVELD, MAENO et TOMIYAMA 2006).

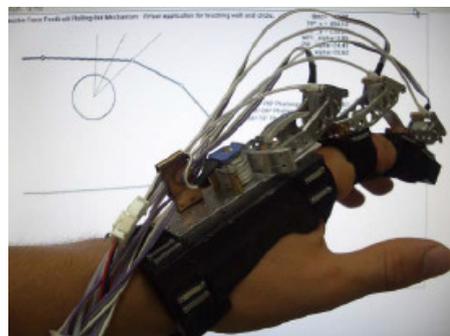


FIGURE 2.3: Exosquelette de l'université de Delft (Étude B) (LELIEVELD, MAENO et TOMIYAMA 2006).

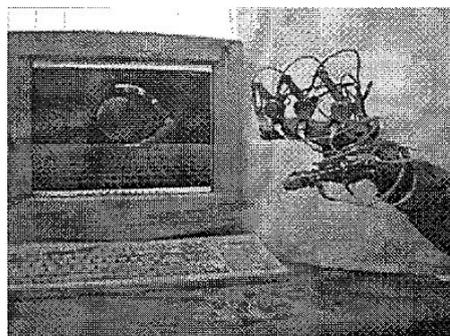


FIGURE 2.4: Exosquelette SKK Hand master II (CHOI et CHOI 1999).



FIGURE 2.5: Bras exosquelette SARCOS (MAEKAWA et HOLLERBACH 1998).

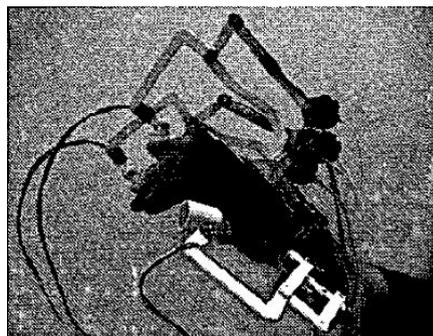


FIGURE 2.6: Interface à trois doigts de l'université de Keio (KOYAMA et al. 2002).

être fixé sur une base. Son poids important est compensé par ses actionneurs hydrauliques ; cependant, il reste encombrant.

- L'exosquelette de l'université de Keio est un exosquelette à trois doigts (pouce-index-majeur) (KOYAMA et al. 2002). Il est composé de trois robots indépendants à trois degrés de liberté, dont deux sont équipés de systèmes pour le retour d'effort basés sur des éléments élastiques passifs (figure 2.6). Il permet de ressentir des raideurs jusqu'à au moins 200 N/m.
- L'exosquelette Sensor Glove 2.1 (figure 2.7) est un exosquelette à cinq doigts et vingt degrés de liberté (NISHINO, KUNII et HASHIMONO 1997). Il est basé sur une architecture sérielle pour chaque doigt et capte l'effort appliqué par l'utilisateur sur l'interface au moyen de jauges de contrainte placées sur sa structure. Bien que sa structure permette un espace de travail similaire à celui de la main, la quantité d'éléments mécaniques et moteurs placés sur le dos de la main le rend encombrant. L'effort maximal pouvant être appliqué aux doigts est de 1,5 N.
- L'exosquelette du LRP (figure 2.8) est un exosquelette à cinq doigts permettant d'appliquer un effort bidirectionnel dans la direction normale au dessus de chaque phalange. Il comporte quatorze degrés de liberté (deux pour le pouce et trois par doigt). Il est composé de trois paires de mécanismes parallèles reliant les phalanges au dos de la main, actionnés par un réseau de tendons. Les moteurs sont déportés à proximité de la main.
- Le gant Cybergrasp (AIPLE et SCHIELE 2013) est une interface haptique liée aux cinq doigts

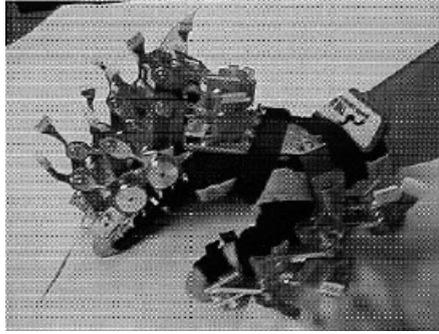


FIGURE 2.7: Exosquelette Sensor Glove 2.1 (NISHINO, KUNII et HASHIMONO 1997).

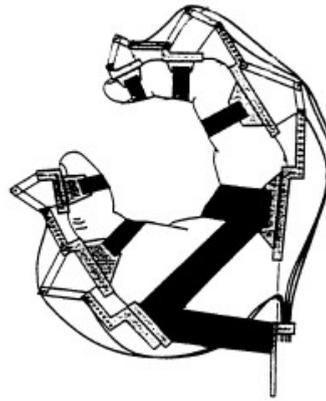


FIGURE 2.8: Exosquelette LRP Dextrous Hand Master (schéma de principe) (TURKI et COIFFET 1995).



FIGURE 2.9: Interface à cinq doigts Cybergrasp (AIPLE et SCHIELE 2013).

de la main (figure 2.9). Ce semi-exosquelette offre un retour d'effort couplé sur les phalanges médiane et distale de chaque doigt. Du fait d'une transmission des efforts par câbles simples, le retour d'effort n'est disponible que selon la normale à la zone de contact. Comme la liaison mécanique aux doigts de l'utilisateur est assurée par un gant, ceux-ci peuvent évoluer librement dans la totalité de leur espace atteignable. Sa capacité en effort avoisine 12 N et sa raideur peut atteindre 50000 N/m sous certaines conditions.

- L'exosquelette ExoHand de FESTO (FESTO 2014) est un exosquelette à cinq doigts. Il permet un retour d'effort bidirectionnel selon un degré de liberté par doigt, couplé sur l'ensemble

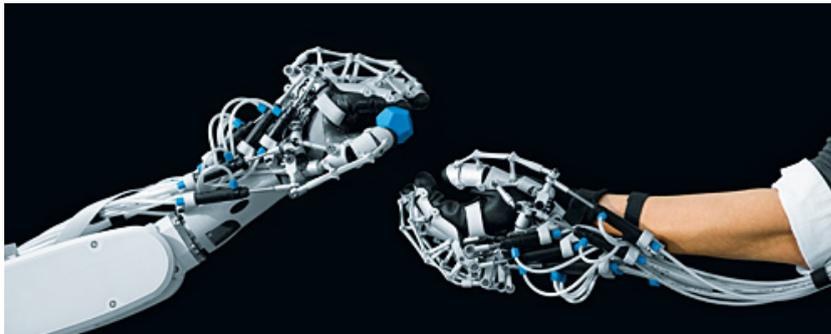


FIGURE 2.10: Interface à cinq doigts FESTO ExoHand (FESTO 2014).

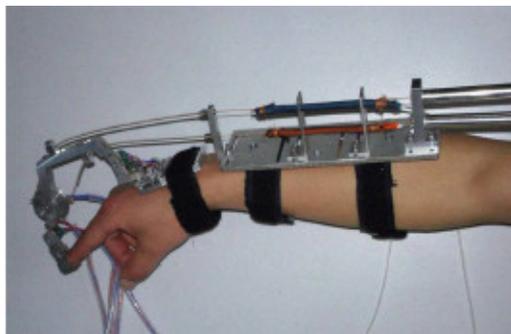


FIGURE 2.11: Interface de l'Université de Nanjing (SUN, MIAO et LI 2009).

des phalanges (figure 2.10). Il est actionné par des vérins pneumatiques.

2.4.2 Interfaces dextres permettant un retour haptique sur les phalanges distales uniquement

- L'interface de l'Université de Nanjing (figure 2.11) est une interface permettant un retour d'effort bidirectionnel sur un doigt (SUN, MIAO et LI 2009). Elle est actionnée par des muscles pneumatiques antagonistes et comporte une structure plus légère que celle des exosquelettes.
- L'interface Master Finger II (MONROY et al. 2008) est une interface à deux doigts (pouce-index). Elle est composée de deux modules indépendants (un pour chaque doigt) et six degrés de liberté par doigt (dont trois motorisés). Le retour d'effort sur chaque doigt est bidirectionnel (figure 2.12). Chaque module dispose de sa propre électronique et motorisation. Il est donc possible de les assembler pour constituer une interface à trois ou quatre doigts, ou même de permettre une interaction bimanuelle (GIACHRITSIS et al. 2009). Cependant, le fait que sa structure soit fixée sur une base fixe limite les mouvements des mains.
- Le gant HAPTEX (figure 2.13) est une interface à deux doigts (pouce-index) conçue pour permettre une manipulation précise mettant en jeu de faibles efforts bidirectionnels (FONTANA, BERGAMASCO et SALSEDO 2009 ; FONTANA et al. 2009). Elle est constituée de deux robots indépendants à trois degrés de liberté, tous pilotés, dont la cinématique relativement complexe

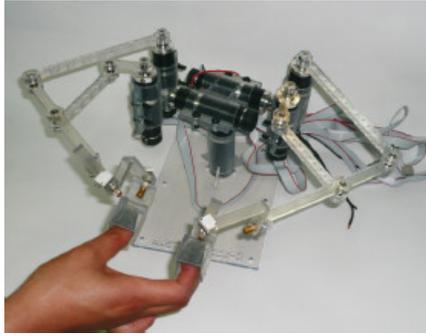


FIGURE 2.12: Interface à deux doigts Master Finger II (MONROY et al. 2008).



FIGURE 2.13: Interface à deux doigts PERCRO HAPTEX (FONTANA, BERGAMASCO et SAL-
SEDO 2009).

suit le mouvement des phalanges. Elle peut appliquer un effort jusqu'à 5 N. Sa raideur apparente est de 1000 N/m. Elle est relativement encombrante (même si le champ de vision n'est pas obstrué au niveau des doigts) et pèse 1,1 kg.

- L'interface WHIPFI (GOSSELIN et al. 2005) est une interface à deux doigts (pouce-index) conçue pour des manipulations fines à deux doigts dans un contexte éducatif (figure 2.14). Elle est composée de deux robots indépendants à six degrés de liberté dont trois sont motorisés. Elle permet un retour d'effort bidirectionnel en un point de contact par doigt selon les trois directions de l'espace. Chaque robot peut parcourir la totalité de l'espace de travail du doigt auquel il est fixé, dans la limite de l'encombrement des systèmes d'attache. Sa capacité en effort est de 0,8 N en continu et 4,7 N en crête, et sa raideur apparente est de 900 N/m. Sa masse avoisine 1 kg.
- L'interface PERCRO Pure Form se concentre sur une interaction à deux doigts (pouce-index) (FRISOLI et al. 2007). Elle est composée de deux robots (un par doigt) à six degrés de liberté dont trois sont pilotés (figure 2.15). Les deux robots sont solidaires au niveau de leur attache, sur l'avant-bras de l'utilisateur. Chaque robot peut parcourir la totalité de l'espace de travail du doigt auquel il est fixé, dans la limite de l'encombrement des systèmes d'attache aux doigts, qui les empêchent d'être trop proches les uns des autres. Sa capacité en effort dépasse les 4 N en continu et 25 N en crête, et sa raideur de commande est supérieure à 5900 N/m.

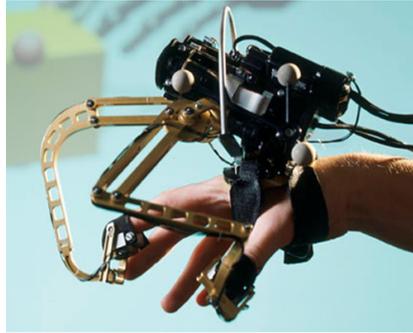


FIGURE 2.14: Interface à deux doigts WHIPFI (GOSSELIN et al. 2005).



FIGURE 2.15: Interface à deux doigts PERCRO Pure Form (FRISOLI et al. 2007).

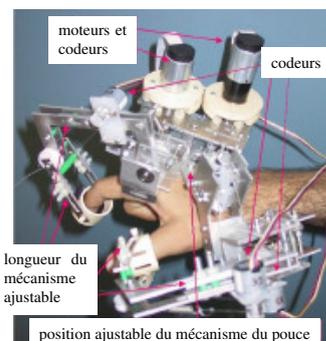


FIGURE 2.16: Interface à deux doigts de l'école des Mines Paristech (STERGIOPOULOS, FUCHS et LAURGEAU 2003).

- L'interface de l'école des Mines Paristech (figure 2.16) est une interface permettant un mouvement libre du pouce et de l'index (dans la limite des systèmes d'attache) (STERGIOPOULOS, FUCHS et LAURGEAU 2003). Il comporte quatre degrés de liberté pour le pouce et trois pour l'index. Un seul moteur par doigt permet de restituer un effort à l'utilisateur. Son poids est conséquent, et compensé par un bras porteur (Virtuose 6D).
- Le gant IHS10 permet une interaction à trois doigts avec un environnement virtuel (GOSSELIN 2012). Trois robots à cinq degrés de liberté chacun sont reliés aux phalanges distales des pouce, index et majeur, et pour chaque doigt, trois moteurs pilotent chacun un degré de liberté (figure 2.17). Tout comme l'interface PHFE, la totalité de l'espace de travail de chaque doigt est couvert dans la limitation de l'encombrement des systèmes d'attache proprement dits qui

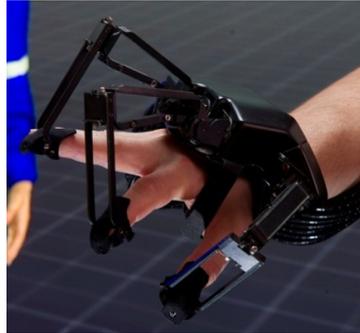


FIGURE 2.17: Interface à trois doigts IHS10 (GOSSELIN 2012).



FIGURE 2.18: Interface à quatre doigts Rutgers Master II (BOUZIT et al. 2002).

limitent le rapprochement des doigts les uns des autres. Il est capable de fournir plus de 10 N en effort en crête et sa raideur est supérieure à 5000 N/m. Sa base est fixée sur le dos de la main.

- Le gant Rutgers Master II (BOUZIT et al. 2002) permet une interaction à quatre doigts (tous excepté l'auriculaire). Le retour d'effort est assuré par des vérins à air comprimé positionnés au niveau de la paume, et n'est disponible que selon la normale à chaque surface de contact (figure 2.18). Par ailleurs, un tel positionnement des vérins à l'encombrement important limite la fermeture de la main à 55% de l'espace atteignable par les doigts. La force maximale transmissible est supérieure à 16 N et la raideur maximale atteint environ 8000 N/m. Il pèse 80 g.
- Les interfaces SPIDAR (LIU et al. 2014 ; SATO 2002 ; YAMADA et al. 2000) sont des interfaces permettant une interaction bimanuelle à quatre ou cinq doigts par main (figure 2.19). Elles sont constituées d'une cage dans laquelle l'utilisateur évolue, avec une capsule fixée à chacun de ses doigts. Celles-ci sont reliées indépendamment à la structure de la cage, par des câbles dont la tension est pilotée par des moteurs. Le retour d'effort est ainsi disponible sur chaque phalange distale selon les trois directions de l'espace.
- Le bras HIRO III (ENDO et al. 2011) est une interface placée en opposition de la main et connectée aux cinq phalanges distales de celle-ci (figure 2.20). Le retour d'effort est assuré pour trois degrés de liberté par doigt. Au contraire des interfaces précédentes, elle n'est pas portée par l'utilisateur. Bien que son espace de travail corresponde à celui des doigts par

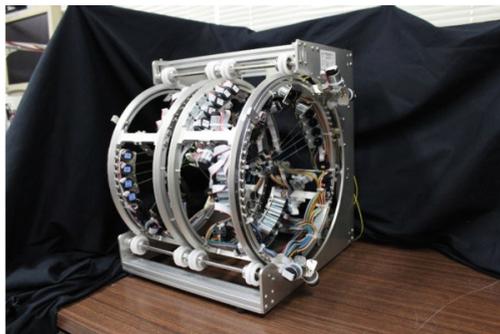


FIGURE 2.19: Interface bimanuelle à cinq doigts SPIDAR-10 (LIU et al. 2014).



FIGURE 2.20: Interface à cinq doigts HIRO III (ENDO, YOSHIKAWA et KAWASAKI 2010).

rapport à la paume, les mouvements de la main sont limités à un demi tore approchant le volume de travail confortable de la main. Le retour d'effort est limité à 3,6 N au niveau des phalanges distales et sa raideur maximale avoisine 5000 N/m.

2.4.3 Bilan de la revue des interfaces manuelles dextres

Cette courte revue montre que les interfaces haptiques dextres peuvent présenter une bonne solution pour rendre l'interaction avec un environnement virtuel plus générique et plus naturelle. Pourtant en pratique, leur encombrement et leur poids représentent une gêne pour l'utilisateur. L'utilisation d'un robot à base fixe permet de palier à ce défaut. Cependant, l'espace de travail est alors réduit et ne correspond plus à celui du bras. De plus, la structure mécanique complexe adaptée au suivi du mouvement des doigts est une source de frottements. Il en résulte pour l'utilisateur une gêne en espace libre qui ne lui permet pas de faire abstraction de l'interface lors de son interaction avec l'environnement virtuel.

Le principe de contact intermittent propose de déconnecter le robot de l'utilisateur en espace libre. Dans ce cas, celui-ci ne ressent plus les effets des frottements et les perturbations de la structure mécanique. La section suivante rassemble l'état de l'art de ces interfaces.

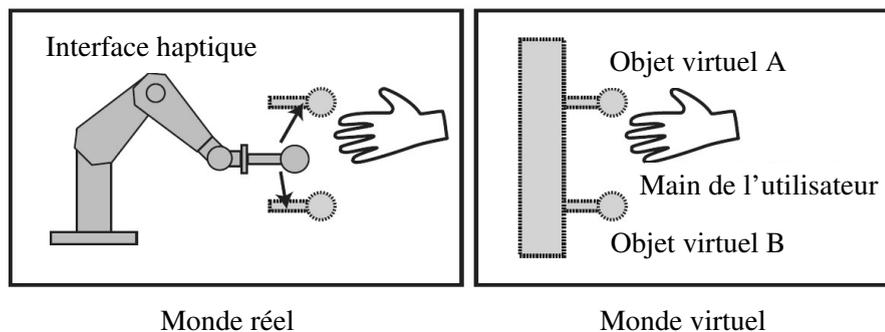


FIGURE 2.21: Principe de fonctionnement des interfaces haptiques *encountered-type* (adapté de (YOKOKOHI, KINOSHITA et YOSHIKAWA 2001)).

2.5 Le contact intermittent

Un grand nombre de travaux propose d'augmenter la transparence des interfaces haptiques en se basant sur les technologies d'actionneurs (BUERGER 2005 ; HAYWARD 1995 ; MILLET et al. 2009), la chaîne de transmission du mouvement (TOWNSEND 1988) ou la commande (COLGATE et BROWN 1994). Cependant, ces approches ne permettent pas d'annuler leur impédance en espace libre. Pour cela, il faut s'intéresser à la liaison mécanique entre l'utilisateur et l'interface. En effet, lorsque l'utilisateur n'est pas au contact de l'environnement virtuel, la liaison mécanique qui le relie au robot n'est utile que pour reconstruire sa position dans l'espace. Il est donc possible de les déconnecter si cette fonction est assurée par ailleurs.

De cette manière, le comportement de l'utilisateur n'est pas perturbé par le robot en espace libre et la transparence de l'interface comme le réalisme de l'interaction sont augmentés. (MCNEELY 1993) a ainsi proposé de déconnecter le robot de l'utilisateur et d'équiper ce dernier d'un casque de réalité virtuelle afin de réduire l'encombrement perçu du système. En parallèle, (TACHI et al. 1994) ont proposé cette déconnexion afin de permettre au système de présenter différentes surfaces à l'utilisateur : ainsi le système peut simuler des surfaces planes comme des arêtes.

2.5.1 Interfaces Encountered-type

Les deux publications précédentes posent les bases du principe de fonctionnement des interfaces haptiques dites *encountered-type*, qui suivent à distance la position de la surface de contact de la main de l'utilisateur dans l'espace, se positionnent au niveau du point de l'environnement virtuel le plus proche et attendent que l'utilisateur vienne à leur contact (figure 2.21). Cette problématique de planification de trajectoire est examinée notamment par (SHIGETA, SATO et YOKOKOHI 2007 ; YOKOKOHI, KINOSHITA et YOSHIKAWA 2001).

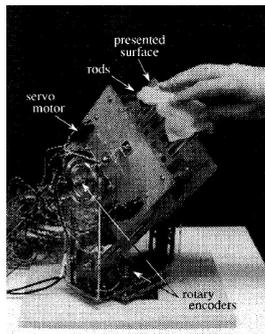


FIGURE 2.22: Interface de l'université de Tokyo (HIROTA et HIROSE 1995).

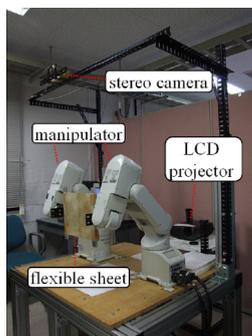


FIGURE 2.23: Interface de l'université d'Osaka (FURUKAWA et al. 2007).

Les interfaces constituant l'état de l'art de ce principe de fonctionnement sont les suivantes :

- L'interface de l'université de Tokyo (figure 2.22) (HIROTA et HIROSE 1995) est une interface à base fixe conçue autour d'une surface de contact déformable à l'aide d'une grille d'actionneurs linéaires. Un système de suivi passif est fixé au doigt de l'utilisateur. La surface est orientée en conséquence. Elle permet de simuler le contact avec une arête ou un sommet et peut restituer un effort jusqu'à 6 N.
- L'interface de l'Université d'Osaka (figure 2.23) est une interface à base fixe constituée de deux robots industriels (FURUKAWA et al. 2007). Ceux-ci sont liés chacun à un bout d'une feuille déformable. Ils peuvent ainsi la déplacer et l'orienter en fonction de la position de la main de l'utilisateur, acquise au moyen d'une caméra stéréo.
- L'interface SATIN (figure 2.24) est une interface à base fixe constituée de deux bras FCS-HapticMaster à trois degrés de liberté, portant une bande haptique articulée (BORDEGONI et al. 2010). Sa courbure et sa torsion sont pilotées par un ensemble d'actionneurs répartis sous sa surface. Les mouvements et déformations appliqués par l'utilisateur sur la bande haptique sont mesurés au moyen de jauges de contraintes.
- L'interface de l'université de Kyoto (figure 2.25) est une interface dont la conception est basée sur l'observation des manipulations humaines (YOKOKOHI et al. 2005). Elle est constituée d'un robot porteur à base fixe à six degrés de liberté et d'un module de contact (pesant 5 kg) à onze degrés de liberté, adapté aux manipulations à trois doigts (3 degrés de liberté pour le pouce, quatre pour chaque autre doigt).

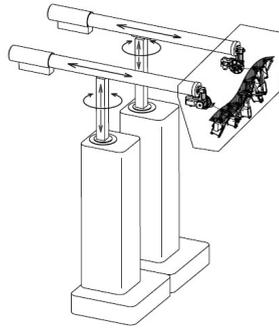


FIGURE 2.24: Bande haptique SATIN (BORDEGONI et al. 2010).

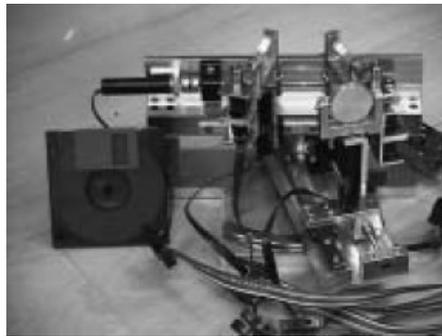


FIGURE 2.25: Module de contact de l'interface de l'université de Kyoto (YOKOKOHJI et al. 2005).

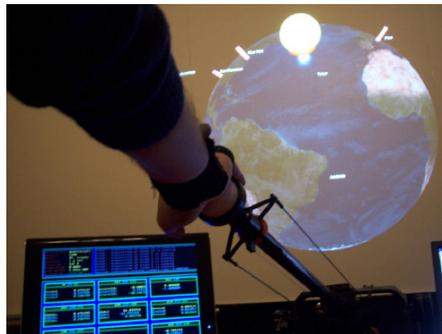


FIGURE 2.26: Interface PERCRO SKILLS (RUFFALDI, AVIZZANO et TRIPICCHIO 2008).

- L'interface PERCRO SKILLS (figure 2.26) est une interface à grand espace de travail, permettant de restituer des contacts avec un environnement en un point de l'espace (RUFFALDI, AVIZZANO et TRIPICCHIO 2008). Les mouvements de l'utilisateur sont suivis par un système de capture de mouvement VICON. Le retour d'effort est assuré par une interface GRAB à trois degrés de liberté. Elle peut générer des efforts continus jusqu'à 4 N et 20 N en crête. Cette interface est utilisée pour simuler le jonglage (RUFFALDI et al. 2011 ; SOLAZZI et al. 2012).

Bien que ces architectures présentent l'avantage d'une grande transparence en espace libre, elles sont basées sur une anticipation du mouvement de l'utilisateur puisqu'elles attendent que celui-ci entre en contact avec elles. La problématique revient donc à la planification du mouvement, qui présente d'importants défis au niveau de la sécurité : lors du rendu d'environnements virtuels

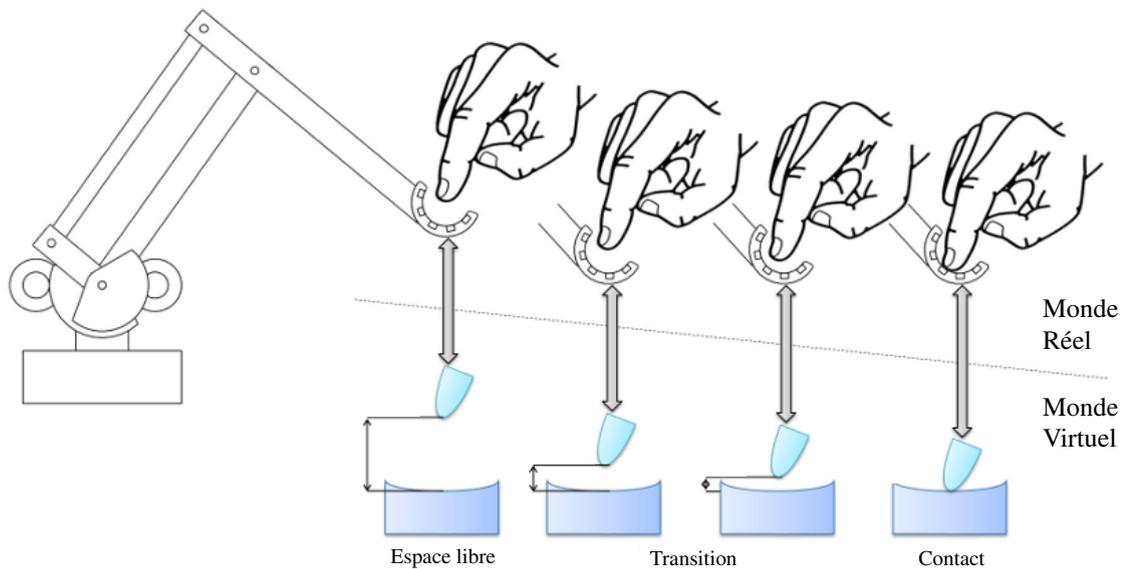


FIGURE 2.27: Principe de fonctionnement des interfaces haptiques *encounter-type*.

concaves, l'utilisateur peut déplacer son doigt lentement tandis que le robot évolue à grande vitesse autour de lui. Les interfaces présentées ci-dessous permettent de résoudre ce problème.

2.5.2 Interfaces Encounter-type

Les travaux de (YOSHIKAWA et NAGURA 1997, 1999) visent à améliorer la restitution de la transition contact/non contact en adjoignant à l'information kinesthésique habituellement présente sur les interfaces haptiques une information tactile, là encore en déconnectant le robot de l'utilisateur. Cependant, contrairement aux interfaces précédentes, le robot qu'ils proposent ne reste pas à proximité de l'environnement mais suit à faible distance les mouvements de l'utilisateur en espace libre. Lorsque l'utilisateur déplace sa main à proximité de l'environnement, l'interface ralentit jusqu'à s'arrêter au moment où son avatar entre en contact avec l'environnement virtuel. Si l'utilisateur continue à se déplacer en direction de l'environnement, alors il entre en contact avec le robot resté immobile. A l'inverse, s'il s'écarte de l'environnement, le robot recommence à le suivre à faible distance (figure 2.27).

Cette approche, dite *encounter-type*, diffère de la précédente par le fait que le robot ne planifie pas sa trajectoire en anticipant sur les mouvements de l'utilisateur. L'interface doit être suffisamment dynamique pour assurer le suivi sans contact des doigts de l'utilisateur, tout en permettant de toucher l'environnement lorsque cela est nécessaire. Parmi les interfaces de ce type, on peut citer :

- L'interface PERCRO PRESENCIA (figure 2.28) est une interface constituée d'une base fixe et d'un bras série à trois degrés de liberté (CINI et al. 2005 ; SOLAZZI et al. 2007). Elle est liée à la phalange médiane de l'index de l'utilisateur. Une plaque orientable est présentée en face



FIGURE 2.28: Interface PERCRO PRESENCIA (SOLAZZI et al. 2007).



FIGURE 2.29: Interface Touch Thimble (KUCHENBECKER et al. 2008).

de sa phalange distale, dont le mouvement est piloté pour ne venir à son contact que lorsqu'il approche d'un objet virtuel. Elle permet de ressentir les grands rayons de courbure.

- L'interface Touch Thimble (figure 2.29) est une interface à un doigt constituée d'une interface haptique PHANTOM, dont le système d'attache classique pour le doigt a été remplacé par une capsule passive. Le doigt y est fixé au moyen d'un anneau, lui-même monté sur la capsule au moyen de ressorts. Leur raideur est suffisamment élevée pour que le déplacement du doigt entraîne le déplacement du robot ; cependant, elle est plus faible que celle de l'environnement virtuel, afin que l'utilisateur expérimente le contact au moyen de ses capteurs cutanés en plus de ses capteurs kinesthésiques.
- L'interface 2D de l'université de Kyoto (figure 2.30) est une interface à base fixe et un doigt permettant d'interagir avec un environnement par l'intermédiaire d'un anneau (YOSHIKAWA et NAGURA 1997). Le mouvement du doigt est suivi par une matrice de capteurs à fibre optique. Elle permet de suivre le doigt dans ses déplacements jusqu'à au moins 50 cm/s et restituer des efforts jusqu'à 1 N.
- L'interface 3D de l'université de Kyoto (figure 2.31) est une interface à base fixe et un doigt permettant d'interagir avec un environnement par l'intermédiaire d'une capsule (YOSHIKAWA et NAGURA 1999). Celle-ci est déplacée et orientée au moyen de deux robots porteurs. Les technologies utilisées sont les mêmes que celles de l'interface précédente.
- L'interface PERCRO PRESENCIA 2 (figure 2.32) est une interface à deux doigts portée sur la main et l'avant-bras dérivée de celle de la figure 2.28. Elle est constituée de modules

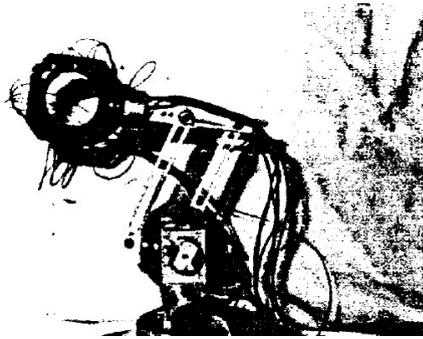


FIGURE 2.30: Interface 2D de l'université de Kyoto (YOSHIKAWA et NAGURA 1997).

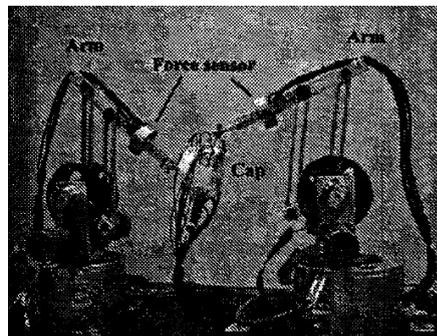


FIGURE 2.31: Interface 3D de l'université de Kyoto (YOSHIKAWA et NAGURA 1999).

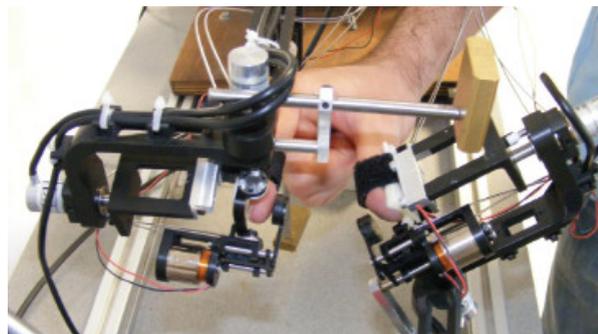


FIGURE 2.32: Interface PERCRO PRESENCIA 2 (SOLAZZI, FRISOLI et BERGAMASCO 2010).

actifs directement fixés aux phalanges médianes des doigts de l'utilisateur (poids par module : 56 g). L'effort maximal restituable est de 1,97 N en continu et 6,7 N en crête.

- L'interface de l'université de Tokyo (figure 2.33) est une interface portée sur le dos de la main, à cinq doigts (NAKAGAWARA et al. 2005 ; SATO et al. 2007). Chaque système pour un doigt est constitué de trois modules déplacés les uns par rapport aux autres au moyen de crémaillères. Un seul degré de liberté par doigt est actionné. Chaque système suit à distance les mouvements du doigt auquel il est associé, en captant les déplacements relatifs d'une plaque réfléchissante plaquée sur l'ongle au moyen d'un ressort à faible raideur. Elle est adaptée pour la téléprésence et la téléopération.
- L'interface du DLR/HIT (figure 2.34) est une interface portée sur le dos de la main, à cinq

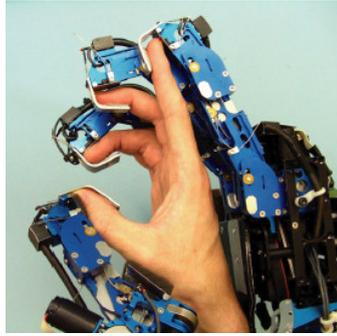


FIGURE 2.33: Interface de l'université de Tokyo (SATO et al. 2007).

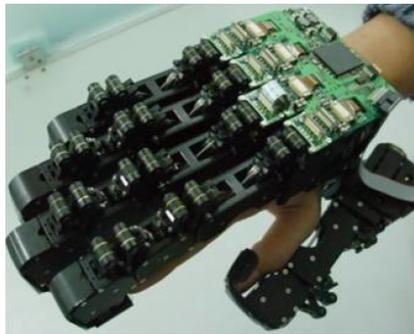


FIGURE 2.34: Interface du DLR/HIT (FANG, XIE et LIU 2009).

doigts (FANG, XIE et LIU 2009). Chaque système pour un doigt est constitué de trois modules liés les uns aux autres par un mécanisme parallèle. Un seul moteur permet de gérer le déplacement du système pour le doigt et de restituer un effort à l'utilisateur. Les mouvements des phalanges distales sont déduits des déplacements d'une plaque métallique reposant sur l'ongle. Il est capable de restituer un effort jusqu'à 8 N.

2.5.3 Bilan de la revue des interfaces à contacts intermittents

Parmi ces interfaces, celles de (NAKAGAWARA et al. 2005) et (FANG, XIE et LIU 2009) présentent un intérêt particulier. En effet, il s'agit d'exosquelettes permettant un retour d'effort sur plusieurs doigts, qui exploitent le principe encounter-type pour adjoindre au retour kinesthésique une information tactile au moment du contact. Leurs résultats montrent que la transition entre espace libre et contact est plus franche qu'avec un système classique. Cependant, chaque interface mesure la distance qui la sépare d'un doigt à partir des mouvements d'une plaque métallique qui repose sur l'ongle, dont le contact n'est pas totalement imperceptible à l'utilisateur. De plus, ce dernier doit supporter leur poids, car elles sont fixées sur le dos de la main. Leur transparence n'est donc pas totale.

L'ensemble de ces travaux démontre un effort de généralisation et d'approfondissement des idées originales de McNeely et Tachi, afin d'accroître la transparence et le réalisme des interfaces haptiques. En effet, si le robot est déconnecté de l'utilisateur en espace libre, ce dernier est totalement libre de ses mouvements. L'interface est ainsi totalement transparente d'un point de vue perceptuel, tout en permettant la mise en œuvre d'un robot de grande raideur afin de garantir un contact et un retour d'effort réalistes. Cependant, les interfaces haptiques *encounter-type* présentent des risques quant à la sécurité, plus réduits au niveau des périphériques *encounter-type*. D'autre part, les périphériques *encounter-type* existants ne permettent pas une interaction à plusieurs doigts, ou ne sont pas totalement déconnectés de l'utilisateur du fait de l'utilisation de plaques réfléchissantes reposant sur les ongles.

2.6 Problématique et contributions de la thèse

L'état de l'art du paragraphe 2.4 montre que les interfaces haptiques dextres permettent à un utilisateur d'interagir plus naturellement avec un environnement virtuel, mais que leur encombrement et leur poids nuit à leur transparence. Par ailleurs, l'état de l'art du paragraphe 2.5 montre que les interfaces à contacts intermittents sont une solution prometteuse pour augmenter la transparence en espace libre, mais qu'elles ne permettent pas d'interagir naturellement avec un environnement virtuel car elles ne sont soit pas adaptées à une manipulation à plusieurs doigts, soit pas totalement transparentes. Cette thèse tente de combiner ces deux approches par l'étude de l'impact du contact intermittent sur la transparence en espace libre, et des zones de contact de la main sur lesquelles son application permettrait une interaction plus naturelle et réaliste.

Pour répondre à cette problématique, nous concevons dans un premier temps un effecteur d'interface à contacts intermittents. Il est ensuite installé à l'extrémité d'une interface haptique. Une loi de commande adaptée est élaborée et l'apport de ce principe sur la transparence de l'interface est évalué. Enfin, une méthodologie de choix des zones de contact à prendre en compte dans la conception d'une interface haptique à plusieurs doigts est proposée. Ces contributions sont détaillées séparément dans la suite.

Conception d'un effecteur pour le contact intermittent

La première contribution de ce travail porte sur le dimensionnement et la conception d'un effecteur pour interface à contact intermittent. Ainsi, dans un premier temps, nous concevons un effecteur d'interface à contacts intermittents de type "encounter-type". Celui-ci doit a priori estimer précisément la géométrie du doigt pour que l'interface puisse venir à son contact au bon

endroit. Dans ce but, il est nécessaire de localiser le doigt par rapport à l'interface. Ces localisations sont accessibles de trois manières différentes :

- Les positions du doigt et de l'effecteur du robot peuvent être déterminées au moyen d'un système de mesure externe. Les coordonnées de l'interface sont alors directement exprimées dans le même repère. Il est cependant nécessaire de reconstruire précisément l'ensemble en 3D tout en gérant les occlusions, avec une fréquence d'échantillonnage élevée, ce qui est actuellement coûteux.
- Le doigt peut être localisé par un système externe de capture de mouvement, et le robot peut être reconstruit par ses capteurs internes. Cette solution ne résout pas les problèmes d'occlusions pour le doigt. De plus, les mesures sont exprimées dans deux repères différents. Il est donc nécessaire de calibrer précisément l'ensemble pour obtenir le positionnement du doigt par rapport au robot.
- Le robot peut être localisé par ses capteurs internes, et la position du doigt par rapport au robot peut être déduite à partir de la mesure de capteurs directement installés au niveau de son effecteur. Cette solution élimine le risque d'occlusion. Elle fournit une mesure directe de la position relative du doigt par rapport à l'effecteur, qui représente l'information critique pour le contact intermittent. La position absolue du doigt est obtenue par combinaison de sa position relative par rapport au robot et de la position du robot par rapport à sa base.

Nous choisissons donc la troisième solution. On note que la précision de la modélisation du doigt nécessaire à un rendu réaliste du contact sur celui-ci ne peut pas être anticipée, de même que le nombre de capteurs nécessaires. Nous étudions donc le problème en deux dimensions, dans la perspective d'étendre les résultats obtenus dans l'espace. Ainsi, pour que le contact puisse avoir lieu en n'importe quel point de la périphérie du doigt tout en limitant la complexité mécanique, nous envisageons l'effecteur sous la forme d'un anneau qui l'entoure. Il devra respecter les principes indicatifs suivant :

- suivi sans marqueur du doigt ;
- fréquence de rafraîchissement élevée (supérieure à 200 Hz) ;
- précision de positionnement sous le millimètre ;
- encombrement réduit.

Élaboration d'une loi de commande pour interface à contacts intermittents

La seconde contribution de cette thèse est une nouvelle loi de commande pour les interfaces à contacts intermittents. Pour la mettre en place, nous montons cet effecteur au bout d'un robot 2D et nous élaborons une loi de commande adaptée aux modes de fonctionnement du contact intermittent :

- suivi de position à faible distance en espace libre ;
- restitution d'un effort au contact ;

– transition entre les deux modes de commande qui ne dégrade pas le réalisme du rendu.

Afin de valider l'approche proposée, nous comparons les performances de dix sujets pendant une tâche de détection de contact d'une part avec une interface 2D classique, d'autre part avec l'interface 2D à contacts intermittents.

Choix des zones de contact à prendre en compte dans la conception d'une interface haptique

Enfin, cette thèse propose une étude de l'augmentation du réalisme de l'interaction sous l'angle des zones de contact de la main impliquées dans les tâches de manipulation du quotidien. Une méthodologie de choix des zones de contact à prendre en compte dans la conception d'une interface haptique est proposée. Elle est utilisée pour élaborer des indices de performance des interfaces existantes et un retour sur les interfaces de la littérature est proposée à travers ce prisme.

Cette thèse contribue ainsi au développement d'une interface haptique à contacts intermittents permettant une interaction plus réaliste en environnement virtuel. Cela est obtenu par la conception d'un effecteur adapté et l'élaboration d'une loi de commande robuste minimisant le nombre de capteurs à intégrer pour le suivi d'un membre. Elle propose aussi une méthodologie de choix des zones de contact à prendre en compte dans la conception d'une interface dextre offrant une interaction plus naturelle avec l'environnement.

Chapitre 3

Conception d'un effecteur de robot pour le contact intermittent

3.1 Introduction

Une interface haptique à contacts intermittents doit être équipée d'un effecteur adapté. Ce dernier doit lui permettre de suivre à distance et sans contact le doigt utilisé par l'opérateur pour interagir avec l'environnement virtuel ou distant. Il doit aussi servir de lieu du contact lorsqu'un retour d'effort doit être appliqué.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la conception d'un tel effecteur adapté à des interactions digitales, et plus particulièrement à des interactions avec l'index, effectuées en 2D. Un cahier des charges est d'abord constitué à partir des performances humaines à adresser pour que l'interface puisse mesurer la position de l'index dans le plan et le suivre sans collision involontaire. Un capteur adapté est ensuite sélectionné et intégré dans la conception d'un effecteur 2D en forme d'anneau. Il est caractérisé puis calibré. Ces mesures sont ensuite utilisées en parallèle d'une modélisation du doigt puis filtrées, afin de fournir une estimation fiable de la position du centre du doigt et de sa géométrie. Les travaux réalisés sont finalement utilisés pour définir des pistes pour la conception d'un effecteur adapté au suivi sans contact d'un doigt dans toutes les directions de l'espace.

3.2 Dimensionnement de l'anneau

Une interface à contacts intermittents ne peut pas suivre instantanément le mouvement d'un doigt. Pour compenser le retard de suivi qui en résulte, un espace suffisant doit être laissé libre entre l'effecteur et le doigt de l'opérateur.

Cette distance dépend de la dynamique du doigt et du temps de réponse du robot. Pour en obtenir un ordre de grandeur, on effectue une simulation du suivi d'un doigt par une des interfaces haptiques les plus communément rencontrées dans les laboratoires (Geomagic PHANToM Premium 1.5 High Force), sur laquelle une instrumentation pour le contact intermittent aurait été adaptée. Pour simplifier les calculs, on utilise une modélisation unidimensionnelle. Les simulations sont effectuées successivement dans toutes les directions de mouvement considérées, ici 2 directions dans le plan. Les modèles utilisés pour le doigt et le robot sont décrits ci-dessous, ainsi que le système de suivi et les résultats de la simulation qui permettent d'en déduire les dimensions de l'anneau.

3.2.1 Modélisation de la cible

D'après (FLASH et HOGAN 1985), on peut considérer que le mouvement du membre supérieur humain obéit au principe de minimisation du jerk¹. Nous faisons ici l'hypothèse qu'il en est de même pour les doigts dans leur mouvement par rapport à la paume. Leur vitesse adopte alors un profil en cloche tel que leur mouvement soit lisse le long de leur trajectoire. Dans un cas unidimensionnel, pour un déplacement d'un point A à un point B , la position du doigt $x_h(t)$ est donnée en fonction du temps t par :

$$x_h(t) = x_A + (x_B - x_A)(6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3) \quad (3.1)$$

avec x_A et x_B les positions initiales et finales respectivement, $\tau = t/t_B$ et t_B la durée du mouvement (on considère que lorsque $x_h = x_A$, $t = 0$ s) (FLASH et HOGAN 1985). Cette expression est utilisée ici pour calculer un point d'arrivée B et une durée du mouvement t_B telle que pendant le mouvement du doigt de A vers B , les vitesses et accélérations maximales cibles $\dot{x}_{h, \max}$ et $\ddot{x}_{h, \max}$ sont atteintes :

$$x_B = \frac{128\dot{x}_{h, \max}^2}{45\sqrt{3}\ddot{x}_{h, \max}} \quad t_B = \frac{16\dot{x}_{h, \max}}{3\sqrt{3}\ddot{x}_{h, \max}} \quad (3.2)$$

1. Dérivée de l'accélération.

3.2.2 Modèle de l'interface

On considère ici que les performances d'un PHANToM Premium 1.5 High Force sont représentatives des performances générales des interfaces haptiques. Nous construisons ici un modèle linéaire unidimensionnel en nous appuyant sur les paramètres équivalents à son premier axe. Le robot peut alors être assimilé à un système masse-amortisseur, donc le mouvement de l'effecteur selon une direction x_r est donné par :

$$m\ddot{x}_r = F - f\dot{x}_r \quad (3.3)$$

avec m sa masse, F la force développée par le moteur et f le coefficient de frottement visqueux. La force maximale F_{\max} pouvant être exercée et la masse apparente m sont fournies par les spécifications du constructeur. Le coefficient de frottement visqueux est obtenu à partir de (ÇAVUŞOĞLU et FEYGIN 2001 ; HU 2009), où une identification dynamique du PHANToM a été menée. L'équivalent linéaire à son premier axe est utilisé ici comme référence. Ses caractéristiques sont :

- Masse apparente : $m = 150$ g,
- Force maximale : $F_{\max} = 37,5$ N,
- Coefficient de frottement : $f = 0,1233$ Ns/m.

3.2.3 Simulation du suivi d'un doigt

Un asservissement du modèle de l'interface haptique en position est simulé (figure 3.1). On utilise un correcteur Proportionnel-Dérivé comme sur les interfaces haptiques usuelles. Notons que la masse a été augmentée à 200 g pour tenir compte du fait qu'un effecteur annulaire à contacts intermittents est plus lourd qu'un effecteur standard de type stylo. De plus, un retard de 2 ms a été introduit pour tenir compte de la chaîne d'acquisition. La consigne de cet asservissement est la trajectoire du doigt obtenue plus haut. Ses gains sont choisis de façon à ce que le système soit stable et présente des performances suffisantes pour la simulation d'un mur virtuel :

$$K_P = 2000 \text{ N/m} \quad K_D = 60 \text{ Ns/m}$$

La figure 3.2 présente un exemple de suivi unidimensionnel d'un doigt en simulation, dans un mouvement de flexion/extension entre un point A , localisé à l'abscisse 0, et un point B , tel que les vitesses et accélérations maximales atteintes par le doigt soient $\dot{x}_{h,\max} = 1,26$ m/s et $\ddot{x}_{h,\max} = 24,5$ m/s². Avec ces paramètres, l'abscisse de B , calculée en utilisant (3.2), est 0,11 m, et le mouvement $A - B - A$ dure $t_B = 0,32$ s. L'erreur de suivi, affichée en parallèle, est au maximum d'environ 3 mm dans ces conditions. On en déduit qu'un espace d'au moins

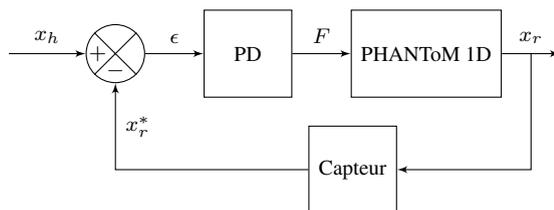


FIGURE 3.1: Modèle unidimensionnel équivalent à un PHANToM suivant un doigt. x_h : position du doigt humain. x_r : position réelle du robot. x_r^* : position estimée du robot. ϵ : résultante de l'erreur de positionnement du robot. F : force motrice. PD : correcteur Proportionnel-Dérivé.

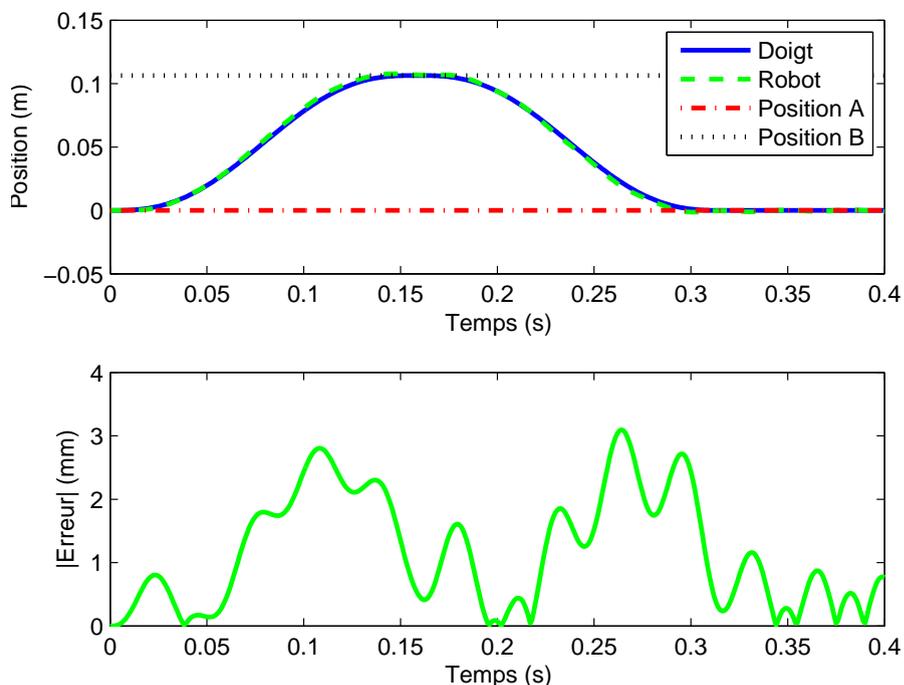


FIGURE 3.2: Trajectoire simulée et erreur de suivi entre une cible (flexion-extension d'un doigt, $\dot{x}_{h, \max} = 1,26$ m/s, $\ddot{x}_{h, \max} = 24,5$ m/s²) et un robot (équivalent 1D d'un PHANToM).

TABEAU 3.1: Erreurs maximales en suivi de position des doigts, obtenues avec une simulation unidimensionnelle d'une interface haptique commune.

Mouvement	Vitesse max (m/s)	Accel. max (m/s ²)	Erreur max (mm)
Doigt adb/add	0,26	4,00	0,60
Doigt flex/ext	1,26	24,50	3,10

3 mm doit être laissé libre entre l'effecteur et le doigt pour tenir compte du temps de réponse de l'effecteur.

Les mêmes calculs sont effectués pour des vitesses et accélérations maximales de 0,26 m/s et 4 m/s², ce qui correspond aux mouvements les plus rapides de l'index en abduction/adduction (tableau 2.3). Les erreurs de suivi obtenues sont affichées dans le tableau 3.1. Celui-ci met en avant la différence d'espace minimum nécessaire en abduction/adduction (0,6 mm) et en flexion/extension (3,1 mm).

3.3 Conception de l'effecteur

L'effecteur d'une interface à contacts intermittents doit permettre de suivre les mouvements du doigt dans toutes les directions, ici dans un plan. Nous avons choisi pour cela de concevoir un effecteur annulaire intégrant sur son pourtour des capteurs de proximité au doigt dont la géométrie et la position peuvent être déduites de la mesure des différents capteurs. Ce paragraphe détaille la sélection d'un capteur adapté à cette tâche et son intégration dans la conception de l'anneau. Les aspects mécaniques et électroniques sont tour-à-tour examinés.

3.3.1 Sélection d'une technologie pour la mesure de distance entre le doigt et l'anneau

Sur les interfaces à contacts intermittents existantes, la mesure est généralement réalisée sur un intervalle 0 – 10 mm, avec une précision en dessous du millimètre (FANG, XIE et LIU 2009 ; NAKAGAWARA et al. 2005 ; YOSHIKAWA et NAGURA 1997). Ces performances sont reprises ici dans le cahier des charges pour la conception de l'effecteur. On cherche par ailleurs à ce que le système ait une fréquence d'échantillonnage la plus élevée possible (typiquement 1 kHz pour les interfaces haptiques classiques). Enfin, on souhaite éviter l'utilisation de marqueurs passifs ou actifs à placer sur le doigt traqué, car ils risqueraient de dégrader la transparence du système. Plusieurs candidats peuvent correspondre à ce cahier des charges, parmi les nombreux capteurs habituellement utilisés en réalité virtuelle :

- *Les capteurs acoustiques* (ROLLAND, DAVIS et BAILLOT 2001) se basent sur des ondes sonores créées par un émetteur et se réfléchissant sur la cible avant de parvenir à un récepteur. Ils ont été implémentés avec succès pour suivre un cœur battant par exemple (KRANJEC et al. 2014). Leur principe de mesure par temps de vol ou différence de phase est relativement simple à exploiter. Cependant leur précision, habituellement de l'ordre de 0,5 à 6 mm pour un taux de rafraîchissement maximal de 200 Hz, et la distance minimale de mesure de 250 mm, ne correspondent pas aux performances requises.
- *Les capteurs capacitifs à effet périphérique* mesurent la perturbation d'un champ électrique par une cible (éventuellement non conductrice), dont les propriétés de capacité propre sont connues, pour en déduire sa proximité. Bien que très prometteuses pour les interactions à distance avec des écrans (MAHARYTA 2013 ; ROZIERE 2013), ces technologies sont relativement encombrantes par rapport à leur intervalle de mesure (une électrode de 25 mm de diamètre n'effectue des mesures que sur une profondeur de champ de 10 mm par exemple) et leur résolution et taux de rafraîchissement sont faibles (ESCAIDA NAVARRO et al. 2013).
- *Les capteurs optiques* utilisables à courte portée et sans marqueurs peuvent être basés sur plusieurs technologies (les systèmes par temps de vol et lumière structurée sont écartés car ils sont généralement encombrants et leur taux de rafraîchissement n'est pas suffisant ici). Les

systèmes de mesure par interférométrie permettent d'effectuer une mesure précise ($\pm 50 \mu\text{m}$) à plus de 1 kHz sur un intervalle de mesure de 1 – 200 mm correspondant au cahier des charges. Cependant, ils sont généralement encombrants du fait de leur électronique embarquée (BLAIS 2004). À leur place, on peut considérer les capteurs de proximité infrarouges. Ils sont basés sur une diode électroluminescente émettant un flash lumineux qui se réfléchit sur la cible. Ils disposent d'une plage de mesure de 1 – 200 mm et d'un taux de rafraîchissement de 1 kHz. Leur précision n'est limitée que par la résolution 16 bits du convertisseur analogique-numérique généralement utilisé. L'intensité de lumière réfléchie sur la cible est quantifiée par un récepteur et peut être reliée à une mesure de distance en utilisant un modèle de réflectance de la cible (NOVOTNY et FERRIER 1999), pourvu que ses propriétés optiques soient connues. Ces capteurs répondent à notre cahier des charges. Finalement, les proximètres par temps de vol (BAXTER 2013) constituent une alternative prometteuse aux capteurs de proximité infrarouge car leur principe de mesure les immunise aux changements des propriétés réfléchives de la peau. Cependant, leurs courbes caractéristiques ne sont a priori pas monotones sur un intervalle 1 – 10 mm (STMICROELECTRONICS 2013). Des traitements des données plus importants seraient nécessaires. Ces capteurs ne peuvent donc pas être facilement intégrés dans la conception de l'effecteur.

On peut conclure de cette courte revue que les capteurs optiques en général et les proximètres infrarouges en particulier apparaissent comme la meilleure solution en regard du cahier des charges de l'effecteur. En pratique, on choisit le capteur Vishay VCNL4000. Il s'agit d'un composant optoélectronique largement distribué, rassemblant sur la même puce un capteur de lumière ambiante et un proximètre infrarouge à 900 nm. Il est généralement intégré dans les téléphones portables et tablettes afin d'éteindre l'écran pour éviter toute fausse manipulation due au contact entre la joue et le téléphone pendant les communications. Il est peu coûteux, tient dans un volume de $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 0,75 \text{ mm}$, effectue ses mesures dans un intervalle de 1 mm à 20 cm et sa résolution spatiale croît avec la proximité.

Du fait de la chaleur qu'elle produit, la peau humaine émet une lumière infrarouge. Ses radiations sont cependant émises à des longueurs d'onde largement supérieures à celles auxquelles le récepteur du capteur est sensible. Elles n'interfèrent donc pas avec son fonctionnement (GAUSSORGUES 1993).

La sélection de ce capteur permet d'initier la conception mécanique et électronique de l'effecteur, comme détaillé dans la suite.

3.3.2 Conception mécanique

Les dimensions internes de l'anneau doivent être plus grandes que celles de n'importe quel index, de façon à ce que tout opérateur puisse l'utiliser. D'après (GREINER 1991), le périmètre

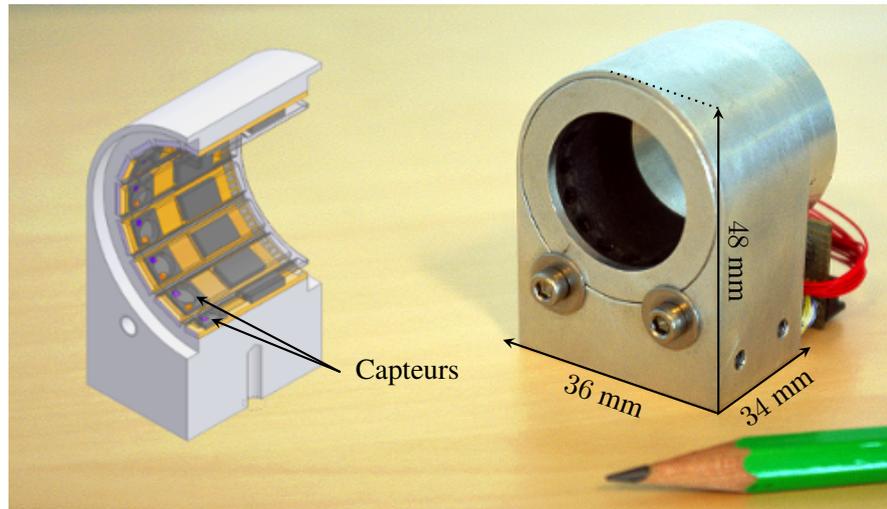


FIGURE 3.3: Effecteur 2D : CAO (gauche : vue en coupe, diaphragmes représentés en semi-transparence) et conception finale (droite). Poids : 80,2 g.

maximum de la phalange distale de l'index est de 63 mm. En première approximation, en considérant que l'index est elliptique avec un ratio de 0,8 entre ses axes, on obtient un demi grand axe de 11,1 mm (8,8 mm pour le demi petit axe, respectivement). De plus, afin d'éviter toute collision non désirée, un espace de 0,6 mm doit être laissé libre entre le doigt et l'effecteur dans le plan horizontal (mouvements d'abduction adduction du doigt en supposant la main horizontale), et 3,1 mm dans le plan vertical (mouvements de flexion-extension du doigt, voir tableau 3.1). Il en résulte un effecteur dont la partie interne serait une ellipse de dimensions $23,8 \times 24,4$ mm. Afin que l'interface soit indépendante de l'orientation du doigt, on arrondit ces valeurs, ce qui conduit à un anneau dont le diamètre interne mesure 24 mm.

On cherche à disposer un maximum de capteurs sur le pourtour de cet anneau afin d'analyser l'influence du nombre de capteurs et de la modélisation sur la perception du contact par l'utilisateur. Compte tenu des dimensions du capteur Vishay VCNL4000 sélectionné, seize d'entre eux sont intégrés dans l'anneau sur des circuits imprimés miniatures avec leur électronique. Leurs champs de vision sont restreints au maximum par des diaphragmes dimensionnés en accord avec les spécifications du constructeur, afin que la mesure soit la plus directionnelle possible. Finalement, les dimensions externes de l'effecteur sont de $48 \text{ mm} \times 36 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$ (figure 3.3). Il pèse 80,2 g avec son électronique.

La masse apparente totale du PHANToM est de 150 g. Sa poignée de base étant un stylet en aluminium équipé de trois potentiomètres, sa masse est d'environ 20 à 30 g. La remplacer par le nouvel effecteur résulterait en une masse apparente d'environ 200 g, en accord avec l'hypothèse retenue pour la simulation du paragraphe 3.2.

3.3.3 Conception de l'électronique et des communications

Résolution du capteur

On cherche à minimiser le temps de cycle de l'instrumentation². La résolution du convertisseur analogique-numérique de chaque capteur est de 16 bits. L'utilisation de 8 bits uniquement permettrait de contenir le temps de communication, car seulement 16 octets par cycle seraient transmis au contrôleur, au lieu de 32. Cela est implémenté au prix d'une perte de résolution, qui a été mesurée à moins de 0,05 mm sur un intervalle de mesure de 1 – 3 mm, et 0,10 mm sur un intervalle 3 – 5 mm en utilisant une cible en plastique. Elle a donc été jugée acceptable en regard de l'erreur de modélisation du capteur (voir paragraphe 3.4.1).

Matériel

Par défaut, chaque capteur de proximité est paramétré avec la même adresse I2C³, qui ne peut être réinitialisée simplement. Il est donc impossible d'en installer plusieurs en série sur un même canal de communication. Pour pallier ce défaut, on peut soit paralléliser les liaisons I2C, soit confier la gestion des communications à des interrupteurs activant et désactivant la transmission des informations avec chaque capteur sur une même ligne I2C. Cependant dans ce dernier cas, le temps de bascule n'est pas instantané (environ 150 μ s d'après la documentation constructeur) et doit donc être pris en compte dans l'ordonnement des mesures, de façon à garantir que l'effecteur reste utilisable avec un taux de rafraîchissement élevé.

On choisit de paralléliser la communication avec les capteurs autant que possible. Il apparaît cependant que si deux capteurs effectuent leur mesure simultanément et que la lumière émise par leurs émetteurs est modulée de la même manière, ils se polluent entre eux. Ce défaut est corrigé en utilisant les différents modes de modulation proposés par les capteurs, qui ont été testés en comparant les caractéristiques capteur qui en résultent (voir paragraphe 3.4.1). Deux fréquences de modulation, occasionnant une perte de résolution de seulement 0,1 mm sur un intervalle de mesure de 1 – 5 mm, ont été sélectionnées. Leur implémentation a permis l'utilisation en parallèle de deux capteurs.

Au final, huit lignes I2C à 400 kbps sont mises en place (figure 3.4). Chacune est gérée par un microcontrôleur ATmega328P, qui communique avec deux capteurs par le biais d'interrupteurs Texas Instruments TCA4311A. Comme une acquisition capteur dure 170 μ s mais que seuls deux capteurs peuvent l'effectuer en même temps, les mesures de l'anneau sont ordonnancées comme

2. Le temps de cycle de l'instrumentation est défini comme le temps écoulé entre l'envoi d'un ordre d'acquisition à l'effecteur par le contrôleur, et la réception de l'information correspondante provenant des seize capteurs par celui-ci.

3. Inter Integrated Circuit.

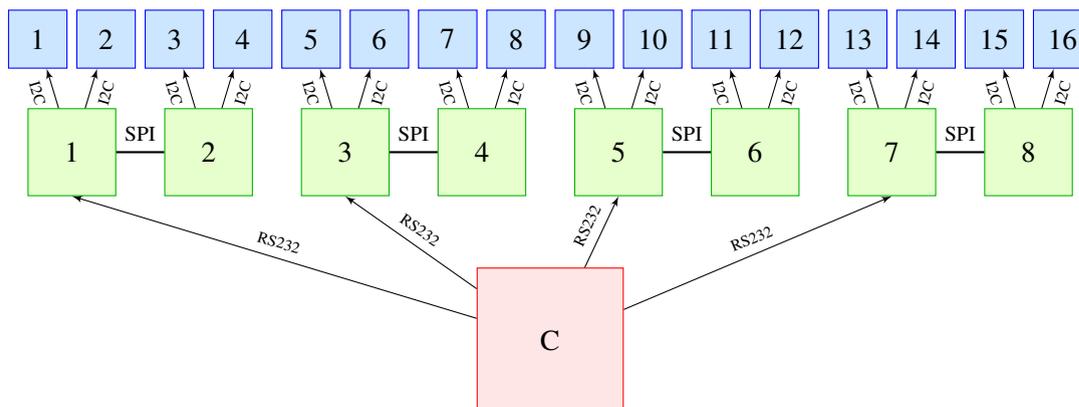


FIGURE 3.4: Architecture schématique générale de la chaîne d'acquisition de l'anneau. Bleu : capteurs. Vert : microcontrôleurs. Rouge : contrôleur. Chaque microcontrôleur gère la communication en I2C avec deux capteurs. Les microcontrôleurs sont associés deux-à-deux par des liaisons SPI. De cette manière, la moitié d'entre eux dialogue avec le contrôleur à travers des liaisons RS232.

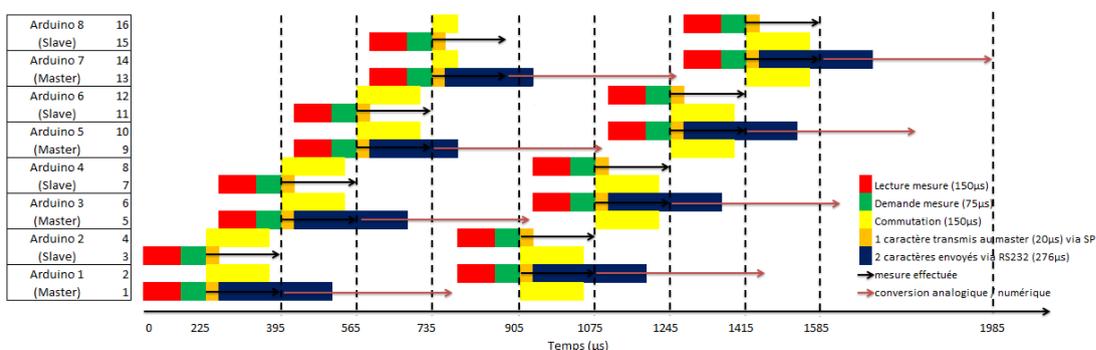


FIGURE 3.5: Chronogramme de l'ordonnancement des mesures (un cycle) faisant apparaître le temps de cycle minimal de 1985 µs.

indiqué sur la figure 3.5. Cet ordonnancement tient compte du temps de conversion analogique / numérique de 400 µs indiqué par la documentation constructeur. À partir de celui-ci, le temps de cycle minimal de l'instrumentation complète vaut $795 + 170 \times 7 = 1985$ µs. La fréquence d'échantillonnage théorique de l'anneau est donc d'environ 500 Hz.

3.4 Caractérisation expérimentale

Le proximètre infrarouge sélectionné a un temps de cycle relativement court (795 µs d'après la documentation constructeur et le chronogramme 3.5). Il effectue des mesures d'intensité lumineuse dont la transmission de l'émetteur au récepteur peut être considérée comme instantanée. Par conséquent, sa bande passante est supposée largement supérieure à la fréquence maximale (7 Hz, voir tableau 2.3) des mouvements des doigts. Il découle de cette hypothèse que des calibrations et validations statiques sont suffisantes pour évaluer la précision du capteur. Ces deux aspects sont examinés dans la suite.

3.4.1 Modélisation du fonctionnement d'un capteur

Le proximètre infrarouge renvoie une image E de l'intensité lumineuse émise par son émetteur, qui s'est réfléchi sur l'objet en face de lui et capté par son récepteur. Nous cherchons ici la fonction permettant de traduire cette sortie E en une distance au capteur. Celle-ci dépend des propriétés optiques de l'objet cible et de l'angle d'incidence, intégrés par l'intermédiaire d'un modèle de réflectance. Dans la littérature (AKENINE-MÖLLER, HAINES et HOFFMAN 2008), le principe d'illumination de Phong est un modèle largement utilisé pour cela. Sa simplicité est un atout pour une application en temps réel. Bien qu'il soit incapable de restituer la diffusion de la lumière dans les couches profondes de la peau humaine (D'EON et LUEBKE 2008), il a été récemment utilisé avec succès pour l'estimation 3D de l'enveloppe d'un doigt dans le cadre de l'élaboration d'un système de pointage (RYU et al. 2010). Nous l'utiliserons donc également ici.

Pour chaque capteur de proximité mesurant la distance le séparant d'une surface qui lui est parallèle, le modèle d'illumination de Phong s'écrit (NOVOTNY et FERRIER 1999) :

$$E = \frac{K}{d^2} \Leftrightarrow d = \sqrt{\frac{K}{E}} \quad (3.4)$$

avec E l'énergie absorbée par la photodiode du capteur, K une constante dépendant des propriétés réfléchissantes de la cible, et $d \geq 0$ la distance linéaire à la cible. Afin de prendre en compte de possibles paramètres sur d et E , l'équation (3.4) est réécrite comme suit :

$$d(E) = \alpha + \sqrt{\frac{K}{E + \beta}} \quad (3.5)$$

avec α et β les décalages sur d , et E respectivement.

Calibration d'un capteur

Pour calibrer un capteur seul en utilisant ce modèle, on réalise le banc d'essai de la figure 3.6. L'extrémité d'un index est placée au-dessus du capteur et maintenue dans une position étendue par un système d'attache. Le mouvement du doigt est guidé verticalement par une glissière et enregistré conjointement par le proximètre et un capteur de déplacements linéaires (LVDT). Le champ de vision du capteur est restreint par un diaphragme de 3 mm de diamètre, permettant une mesure directionnelle tout en préservant une profondeur de champ suffisante. De plus, comme la sortie du capteur en fonction de la distance n'est monotone que pour une distance au récepteur du capteur supérieure à 1 mm selon les spécifications du constructeur, la surface supérieure du diaphragme est placée à une distance normale de 1 mm de ce récepteur. Les mesures sont effectuées sur un intervalle de 1 – 10 mm, avec le doigt d'un utilisateur dans un premier temps. Une optimisation non linéaire aux moindres carrés totaux (MARKOVSKY et VAN HUFFEL 2007)

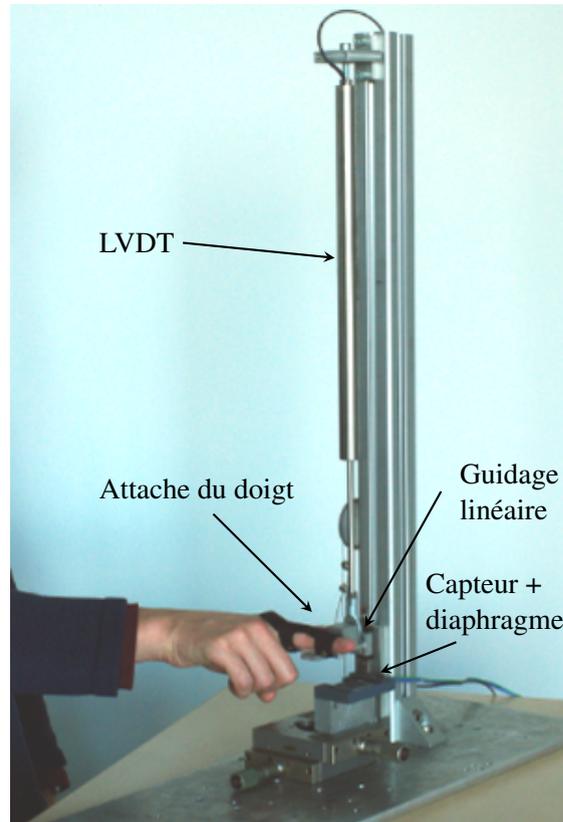


FIGURE 3.6: Vue d'ensemble d'un banc d'essai 1D pour la calibration d'un capteur de proximité infrarouge seul.

est effectuée sur les paramètres α , β et K , résultant en la courbe verte de la figure 3.7. La sortie du capteur (qu'on suppose être une image de l'énergie lumineuse captée par la photodiode et assimilée à E dans la suite) et sa distance au doigt d sont simultanément enregistrées puis confrontées (figure 3.7, points bleus).

Ce résultat montre que les points expérimentaux sont approchés de manière satisfaisante par une optimisation des paramètres de l'équation (3.5) sur un intervalle 1 – 10 mm. Dans l'ensemble, ces paramètres permettent d'aboutir à une précision de la mesure capteur de $\pm 0,15$ mm à une distance de 3 mm et $\pm 0,2$ mm au contact (qui a lieu à une distance de 1 mm). Elle est donc satisfaisante en regard du cahier des charges.

3.4.2 Réflectance de la cible

La réflectance de la peau éclairée par l'émetteur infrarouge à 900 nm peut différer d'un utilisateur à l'autre (KANZAWA et KIMURA 2011 ; PAVLIDIS et SYMOSEK 2000). Pour que chacun puisse utiliser le dispositif, il est nécessaire d'en annuler l'influence. Pour cela, on suppose qu'un changement des propriétés réfléchives de la peau se traduit globalement par une translation de

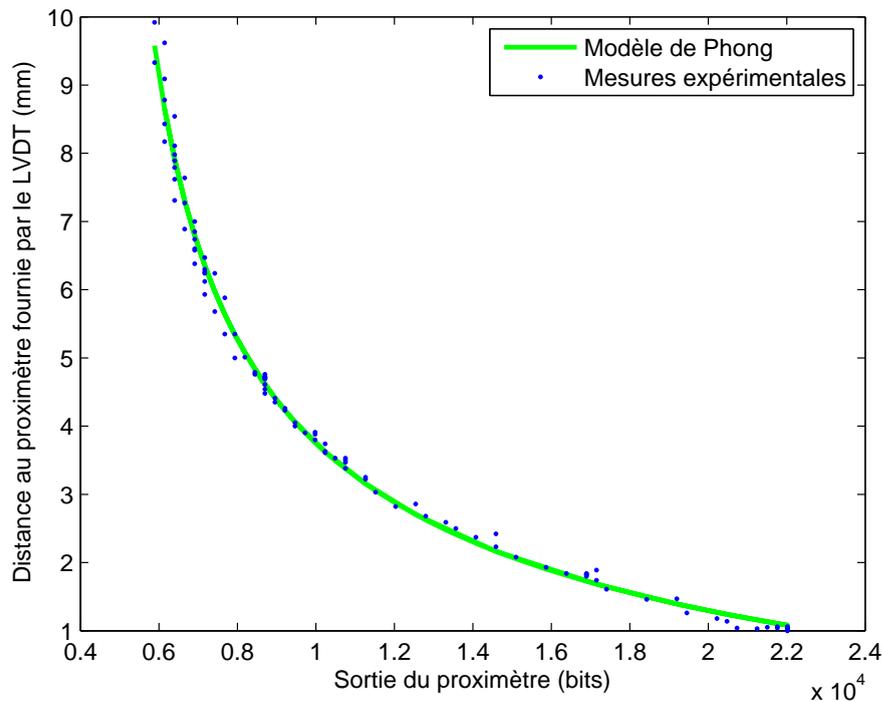


FIGURE 3.7: Caractéristique d'un proximètre infrarouge obtenue avec un doigt, et modèle d'illumination de Phong recalé par moindres carrés totaux, en fonction de la distance au capteur.

la caractéristique capteur. Afin de valider cette hypothèse, il a été demandé à six personnes différentes (quatre hommes et deux femmes, d'un âge compris entre 23 et 34 ans) de calibrer le capteur avec leur index après avoir signé un formulaire de consentement éclairé. Les modélisations résultantes sont rassemblées sur la figure 3.8.

On constate que les positions des courbes varient significativement selon les utilisateurs, ce qui montre qu'un modèle unique ne peut pas être implémenté une fois pour toutes et fournir une mesure précise pour tout utilisateur. De plus, en pratique, le test de l'instrumentation (voir paragraphe 3.5) révèle que la sortie varie également d'un capteur à l'autre, du fait de différences géométriques (tolérances sur le positionnement relatif des capteurs respectivement au diaphragme ou précision du diamètre du diaphragme par exemple). Par conséquent, une calibration complète de chacun des capteurs de l'instrumentation 2D finale devrait théoriquement être effectuée avec chaque utilisateur afin que la distance de son doigt à chaque capteur soit précisément estimée. Une telle calibration n'est bien sûr pas envisageable.

Afin d'éviter une telle procédure fastidieuse, on propose une solution intermédiaire. Tout d'abord, tous les capteurs sont pré-calibrés une fois pour toutes en utilisant un réflecteur sphérique de Motion Capture (MoCap), dont les caractéristiques se révèlent similaires à celles d'un doigt (voir figure 3.8) tout en ayant une géométrie connue (simplifiant de fait son positionnement précis en face de chaque capteur). Ensuite, juste avant que le système ne soit utilisé par un opérateur, un seul capteur de référence est calibré avec son doigt. Les paramètres du modèle obtenu avec la

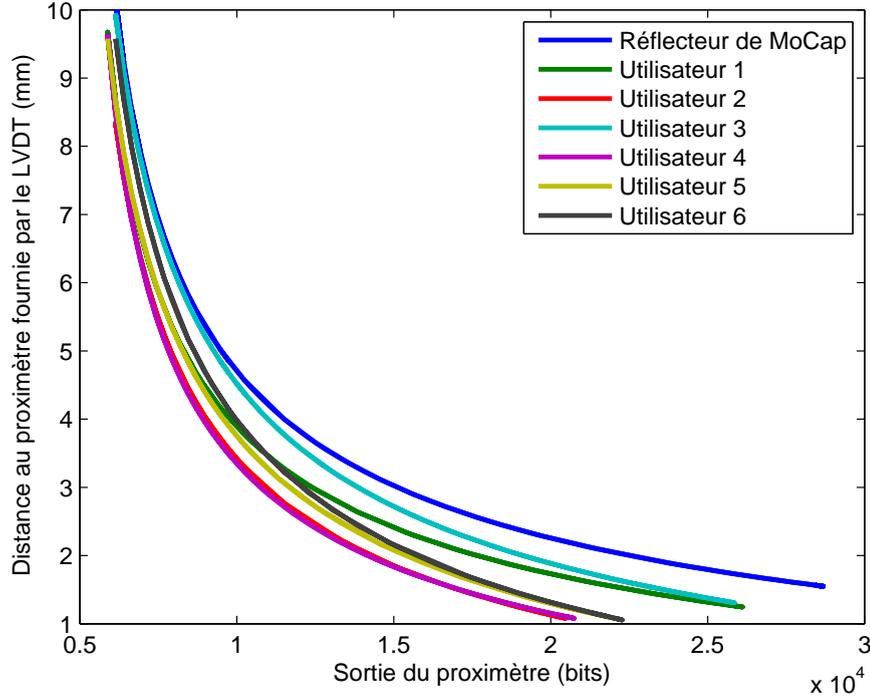


FIGURE 3.8: Caractéristiques capteurs obtenues avec les index de six utilisateurs et un réflecteur de Motion Capture.

sphère de MoCap pour ce capteur sont alors ajustés de telle sorte que le modèle corresponde à la caractéristique obtenue avec le doigt. Finalement, les paramètres de tous les autres capteurs sont décalés d'autant. Deux ajustements différents sont proposés (voir figure 3.9) :

- **Calibration grossière** : Le doigt f est simplement mis en contact avec le diaphragme d'un capteur de référence rp . Aucun équipement supplémentaire n'est nécessaire à la calibration dans ce cas et on obtient seulement une mesure :

$$d_{rp_f}(E_{\max, rp_f}) = 1 \text{ mm} \quad (3.6)$$

avec E_{\max, rp_f} la sortie maximale du proximètre de référence à 1 mm de la peau (d_{rp_f} étant la fonction définie par (3.5)). Afin de faire correspondre la courbe de référence obtenue avec la sphère de MoCap m à cette valeur, elle est simplement translatée verticalement. Ainsi, le paramètre sur la distance du proximètre de référence α_{rp_f} est mis à jour en utilisant :

$$\alpha_{rp_f} = \alpha_{rp_m} + \alpha_{v, rp} \quad (3.7)$$

avec α_{rp_m} le paramètre sur la distance au proximètre de référence obtenu avec la sphère de MoCap, $\alpha_{v, rp} = (1 - d_{rp_m}(E_{\max, rp_f}))$, et $d_{rp_m}(E_{\max, rp_f})$ la distance de la sphère de MoCap au proximètre de référence pour l'énergie E_{\max, rp_f} . Le même paramètre est utilisé pour les

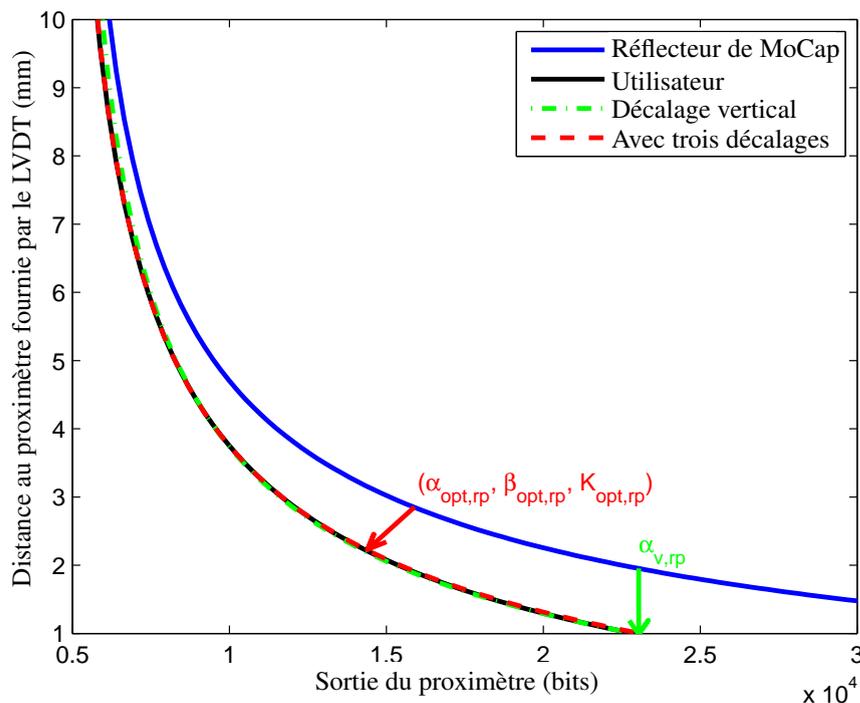


FIGURE 3.9: Résultats des solutions d'ajustement proposées pour la calibration d'un capteur positionné en face d'un doigt. En vert, la caractéristique de la sphère de MoCap est translatée verticalement afin de correspondre à la courbe utilisateur au niveau du point de contact (des erreurs significatives sont observées à grande distance). En rouge, les trois paramètres de la caractéristique de la sphère de MoCap sont recalés afin de correspondre au mieux à la caractéristique utilisateur sur l'intervalle de mesure.

autres capteurs, c'est-à-dire que pour chaque proximètre p_i , on a :

$$\alpha_{p_i,f} = \alpha_{p_i,m} + \alpha_{v,rp} \quad (3.8)$$

Dans ce cas, le paramètre sur l'énergie n'est pas modifié :

$$\beta_{rp_f} = \beta_{rp_m} \quad (3.9)$$

$$\beta_{p_i,f} = \beta_{p_i,m} \quad (3.10)$$

- **Calibration fine** : Le doigt est placé en face du proximètre de référence et on utilise un capteur externe additionnel comme un LVDT pour mesurer ses déplacements en face du capteur. De cette manière, des mesures expérimentales sont obtenues à différentes distances du capteur. Dans ce cas, les décalages sur les trois paramètres du proximètre de référence sont mis à jour de façon à minimiser la distance aux moindres carrés entre la courbe MoCap mise à jour et la courbe obtenue avec le doigt. Ces paramètres additionnels $\alpha_{opt,rp}$, $\beta_{opt,rp}$ et $K_{opt,rp}$,

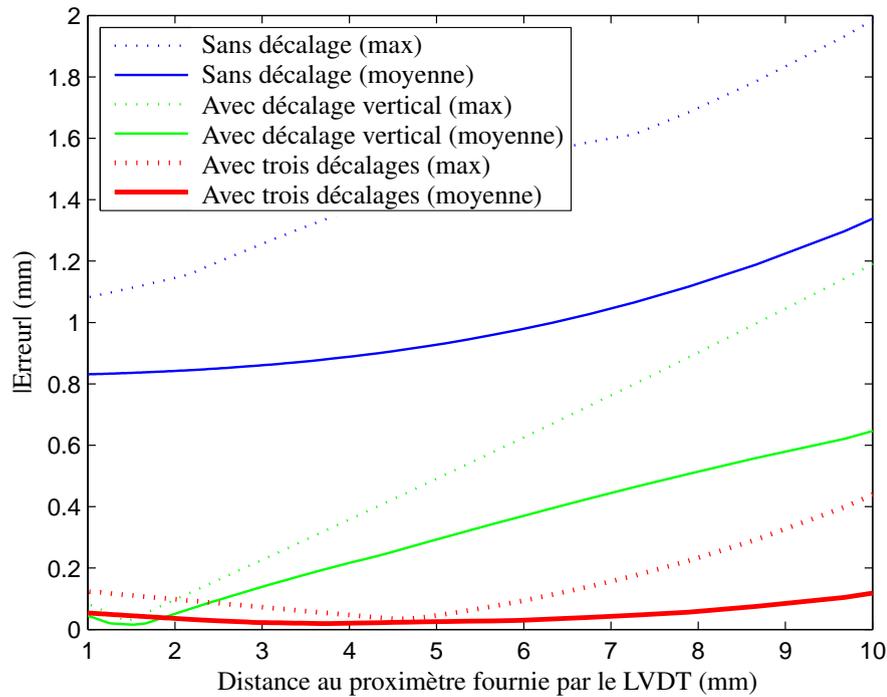


FIGURE 3.10: Erreurs moyennes et maximales entre les six courbes caractéristiques réelles de la figure 3.8 et la caractéristique de la sphère de MoCap sans paramètre, avec un paramètre vertical et avec trois paramètres.

qui sont optimaux pour le proximètre de référence, sont ensuite utilisés pour adapter les paramètres des autres proximètres, c'est-à-dire pour chaque capteur p_i :

$$\alpha_{p_i,f} = \alpha_{p_i,m} + \alpha_{opt,rp} \quad (3.11)$$

$$\beta_{p_i,f} = \beta_{p_i,m} + \beta_{opt,rp} \quad (3.12)$$

$$K_{p_i,f} = K_{p_i,m} + K_{opt,rp} \quad (3.13)$$

Les erreurs moyennes et maximales des mesures des six sujets de la figure 3.8 sont représentées sur la figure 3.10 en fonction de la distance au proximètre, tout d'abord sans paramètre, ensuite avec un paramètre vertical calculé à partir du point de contact expérimental uniquement et finalement avec des paramètres sur chaque paramètre. On remarque que, sans correction, l'erreur entre les positions des doigts et la sphère de MoCap croît avec la distance au capteur et est en moyenne de 1 mm (et 1,5 mm au maximum) à une distance de 6 mm, ce qui est inadéquat. Un décalage vertical permet de détecter plus précisément le contact en diminuant l'erreur à proximité du contact. Cependant à une distance de 7 mm, elle vaut toujours 0,5 mm en moyenne (0,7 mm au maximum) et la dispersion est plus importante. Finalement, l'introduction des décalages des trois paramètres du modèle de la sphère de MoCap permet une bonne approximation du modèle du doigt, avec une erreur moyenne de 0,1 mm entre 1 et 10 mm. De tels paramètres peuvent être calculés avec un système unidimensionnel simple de calibration et s'avèrent satisfaisants.

Dans la suite, les deux ajustements proposés sont mis en œuvre et comparés pour la calibration et la validation de l'effecteur complet.

3.5 Calibration et validation de l'anneau

Pour compenser de possibles disparités des sorties des capteurs dues à des défauts d'alignement avec les diaphragmes par exemple, une calibration préliminaire séparée de chaque proximètre est effectuée en utilisant la sphère de MoCap comme décrit au paragraphe précédent. Le système est ensuite validé par l'intermédiaire d'un banc d'essais permettant une comparaison précise des reconstructions du doigt effectuées par l'anneau et à partir d'une photo.

Dans toute la suite, nous exprimerons la précision \mathcal{E} des mesures sous la forme :

$$\mathcal{E} = x \pm \sigma$$

avec x la justesse de la mesure, c'est-à-dire l'écart de la moyenne des mesures à la valeur vraie du paramètre observé, et σ la fidélité de la mesure, exprimée comme l'écart-type des points de mesure pour une même valeur du paramètre observé (NF ISO 5725 1994).

3.5.1 Calibration de l'anneau

Pré-Calibration

Le comportement de chaque capteur n'est pas rigoureusement le même que celui de ses voisins du fait de défauts de positionnement lors de leur intégration dans l'effecteur. Par conséquent, chaque capteur doit d'abord être pré-calibré séparément. Pour cela, le banc d'essais du paragraphe 3.4 est modifié de façon à ce que l'anneau puisse être installé dessus, par l'intermédiaire d'une pièce permettant sa rotation précise autour de l'axe de révolution de son cylindre interne. La direction de mesure de chaque capteur peut être ainsi alignée tour-à-tour avec celle du LVDT (figure 3.11). La caractéristique de chaque capteur est identifiée en utilisant la sphère de MoCap déplacée verticalement dans l'anneau. Le modèle de l'équation (3.5) est ensuite recalé sur ces points expérimentaux indépendamment pour chaque capteur, résultant en une calibration précise de l'ensemble. Chaque capteur permet ainsi de mesurer la position de la sphère selon sa direction de mesure sur un intervalle de 1 – 10 mm avec une précision de $0 \pm 0,2$ mm.

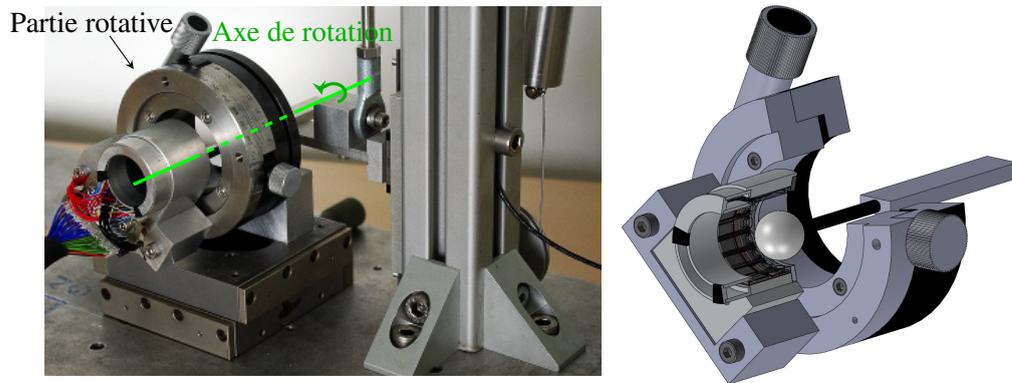


FIGURE 3.11: Détail du banc de calibration pour l'anneau et CAO correspondante.

Calibration Grossière

La sortie d'un capteur de référence (celui situé à la base de l'anneau) est enregistrée en plaçant un doigt au contact de son diaphragme. Cette information est utilisée pour calculer un décalage vertical propagé à l'ensemble des capteurs, en utilisant les équations (3.7) et (3.8).

Calibration Fine

La sortie d'un capteur de référence (celui situé à la base de l'anneau) en fonction du déplacement vertical d'un doigt en face de celui-ci est enregistrée conjointement avec la sortie du LVDT. Une optimisation paramétrique est effectuée afin de calculer les trois paramètres des équations (3.11), (3.12) et (3.13).

3.5.2 Validation de l'instrumentation

Pour valider la méthode de calibration de l'anneau, nous mesurons la précision de l'instrumentation complète pour les deux méthodes présentées dans le paragraphe précédent, avec six utilisateurs. Pour chacun, la réponse du capteur de référence (situé en bas de l'anneau) est enregistrée lors d'un déplacement vertical de leur index. Nous réalisons une calibration grossière en calculant les décalages verticaux via les équations (3.7) et (3.8). Une calibration fine est ensuite effectuée à partir d'une optimisation sur les trois paramètres en appliquant les équations (3.11) à (3.13). On met ensuite en place un nouveau banc d'essai pour enregistrer la forme du contour d'un doigt par deux moyens de mesure différents. Comme indiqué sur la figure 3.12, on réalise un support sur lequel la main de l'utilisateur est attachée. Son doigt est ainsi maintenu étendu et immobile. Une pièce mécanique permet de dessiner un trait sur le pourtour du doigt dans le plan de mesure de l'anneau. Une image de cette ligne est acquise avec un appareil photo positionné en vis-à-vis (indiqué par des tirets noirs sur les figures 3.13 et 3.14). En parallèle de cette mesure,

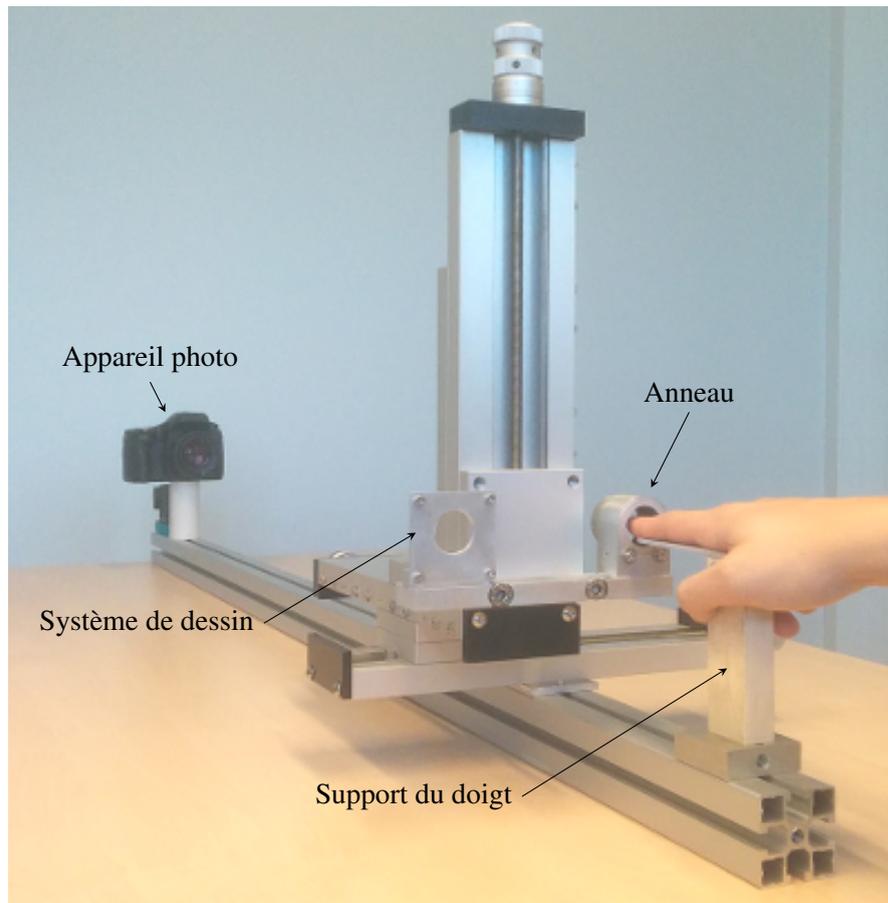


FIGURE 3.12: Banc de validation final (attaches du doigt à son support non représentées).

le banc d'essai est translaté de façon à ce que l'anneau puisse être positionné à l'emplacement exact du système de dessin. Dans cette configuration, le contour du doigt est aussi enregistré avec l'anneau au moyen de ses capteurs.

Reconstruction du Contour et du Centre du Doigt

Les performances de l'anneau calibré avec les deux méthodes proposées sont d'abord évaluées en comparant le contour ainsi obtenu avec celui fourni par l'appareil photo, le doigt étant placé en son centre. Ces trois mesures sont superposées et comparées sur la figure 3.13 (petites croix bleues, points noirs et verts).

Calibration Grossière (paramètres verticaux) : Sur cette figure, la coupe du doigt reconstruite par l'anneau avec les paramètres verticaux apparaît corrélée aux données de la caméra, avec une précision de l'estimation des distances aux capteurs de $0,3 \pm 0,3$ mm. Ce résultat est obtenu suite à un processus de calibration très simple au cours duquel l'utilisateur met seulement en contact son doigt avec le diaphragme d'un capteur. Une seule mesure est réalisée, consistant

paramètres verticaux, puis avec trois paramètres, et enfin à l'aide de la photo. Leur comparaison aboutit sur cet exemple à une erreur de positionnement de 0,3 mm, quelle que soit la procédure de calibration utilisée. Cela peut s'expliquer par le fait que les erreurs d'estimation sur un capteur sont compensées par les erreurs sur le capteur qui lui fait face dans l'anneau.

Déplacement d'un doigt dans l'espace de l'anneau

Comme précédemment, le doigt de chaque utilisateur est placé à l'intérieur de l'anneau de façon à ce que son centre corresponde grossièrement au centre de l'anneau (d'où une erreur de positionnement à la position (0,0), sans influence sur la précision de la mesure de l'anneau). Il est ensuite déplacé dans l'espace de mesure de l'anneau avec un pas de 1 mm, d'abord verticalement, puis horizontalement, et enfin dans les deux directions à la fois. Les résultats obtenus pour un utilisateur avec les mesures expérimentales de l'anneau et des décalages verticaux sont représentés à l'aide de croix bleues sur la figure 3.14 pour chaque position du doigt. Les mesures obtenues avec trois décalages sont représentées par des points verts. Enfin, chaque set de mesure est comparé à la reconstruction du doigt correspondante, extraite d'une image simultanément acquise par l'appareil photo (tirets noirs).

Calibration grossière : On remarque qu'avec les paramètres verticaux, la géométrie du doigt est systématiquement surestimée au centre de l'espace de l'anneau, tandis que l'erreur d'estimation diminue dans les zones proches du contact. Ce résultat est conforme à ce qui avait été observé sur un seul capteur avec cette méthode de calibration (voir paragraphe 3.4.2 et figure 3.10).

Calibration fine : En utilisant les décalages sur les trois paramètres, le doigt apparaît globalement bien reconstitué dans l'ensemble de l'espace de mesure de l'anneau.

En tout, treize acquisitions de doigts ont été effectuées avec chaque utilisateur, pour un total de 75 mesures (trois mesures erronées ont été écartées). Il en résulte les erreurs d'estimation générales pour chaque capteur affichées sur la figure 3.15, en bleu en utilisant les paramètres verticaux, en vert en utilisant les décalages sur les trois paramètres. Finalement, par le calcul du barycentre du polygone tel que présenté ci-dessus appliqué à chaque acquisition, la précision de l'estimation de la position du centre du doigt est la même en utilisant les paramètres verticaux ou les décalages sur les trois paramètres : $0,3 \pm 0,2$ mm sur l'espace de mesure de l'anneau. Ce résultat confirme que bien que l'utilisation d'un ajustement avec décalage vertical introduise une erreur systématique de reconstruction sur les mesures des capteurs prises séparément, ces erreurs se compensent. On pourra ainsi choisir, en fonction de la précision requise par l'application visée, soit une calibration très simple utilisant seulement un décalage vertical, soit une autre plus complète utilisant trois décalages et permettant d'obtenir une reconstruction plus précise du contour du doigt.

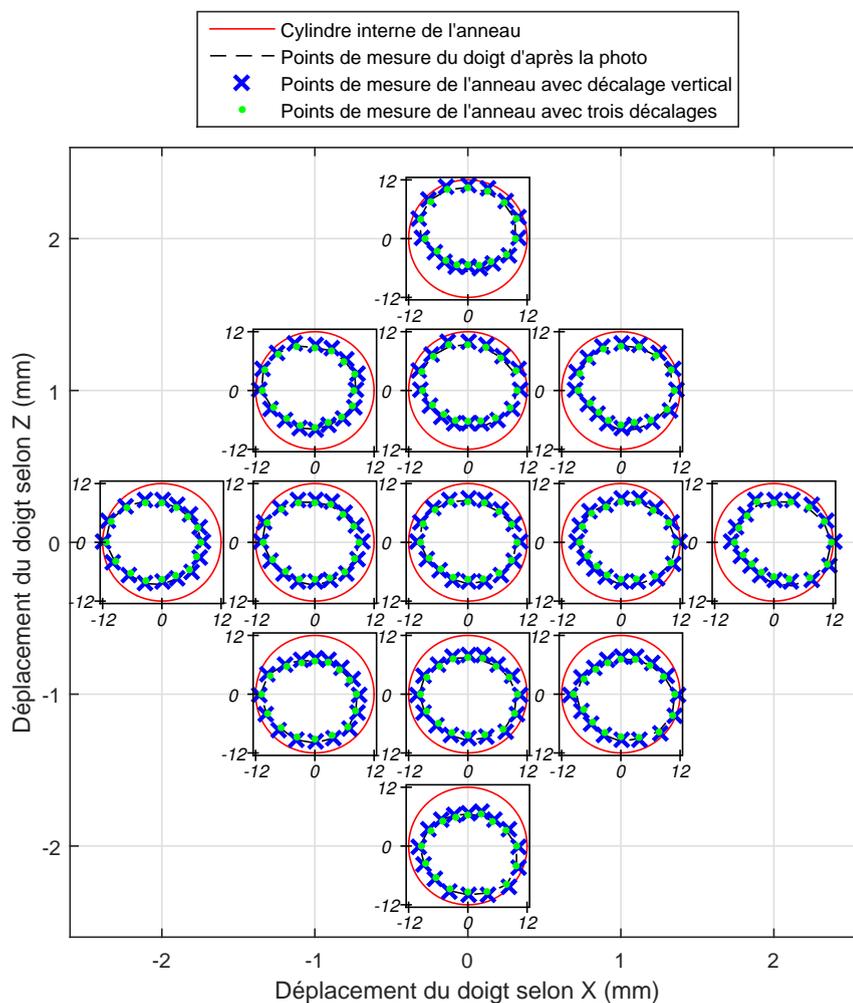


FIGURE 3.14: Déplacements du doigt d'un utilisateur dans l'espace de l'anneau. Chaque reconstruction de doigt est affichée séparément en fonction de sa localisation dans l'anneau, et représentée à une échelle plus petite (voir les données en italique, valeurs en mm).

3.5.3 Bilan et performances de l'anneau

L'anneau que nous avons développé dépasse l'état de l'art car il est plus exact qu'une matrice de fibres optiques (YOSHIKAWA et NAGURA 1997) tout en étant moins encombrant. Il effectue une mesure en 2D du contour du doigt de l'utilisateur sans y être lié mécaniquement. Les méthodes simplifiées présentées dans le paragraphe 3.4.2 garantissent une reconstruction du doigt suffisamment exacte avec une phase d'initialisation très courte. Par ailleurs, comme énoncé plus haut, les erreurs sur la reconstruction du centre du doigt sont les mêmes en utilisant les décalages verticaux ou les décalages sur les trois paramètres, ce qui prouve que les défauts de reconstruction géométriques se compensent les uns les autres.

Dans le même ordre d'idée, la reconstruction du centre du doigt pour ces mêmes expérimentations en utilisant le modèle de la bille sans aucun recalage aboutit à une précision de $0,3 \pm$

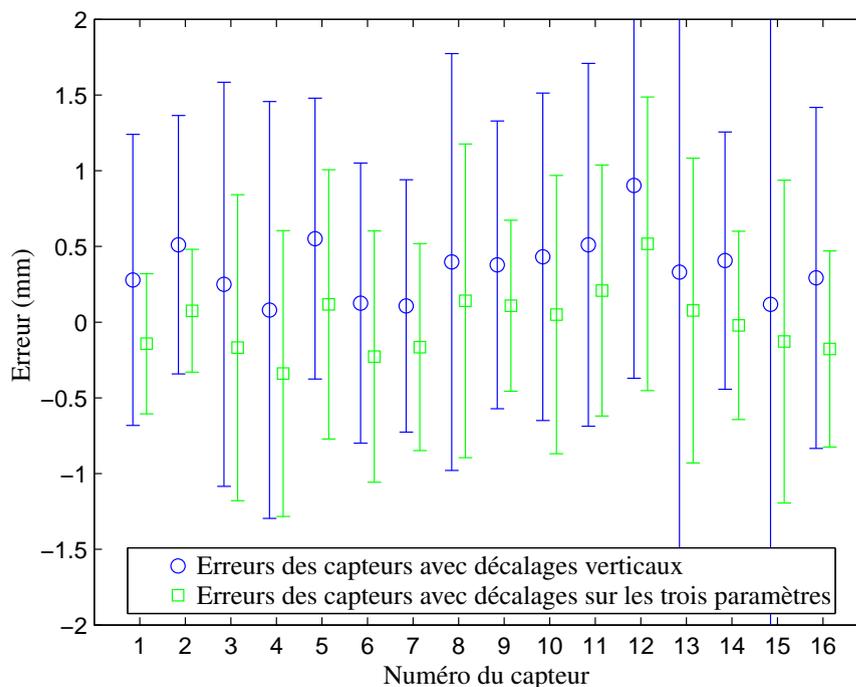


FIGURE 3.15: Moyennes (\circ et \square) et écarts-types (barres d'erreur) sur les erreurs pour chaque capteur, sur les 75 mesures effectuées (13 par utilisateur, 3 mesures ignorées) pour les six utilisateurs du paragraphe 3.5 (les capteurs sont numérotés dans le sens horaire, à partir de celui à la base de l'anneau).

0,3 mm, très similaire aux précisions précédentes. On en déduit que dans le cas d'une application où seul le centre du doigt est utile, la pré-calibration avec la sphère de MoCap est suffisante et il n'est pas nécessaire de calibrer le système pour chaque utilisateur.

Les caractéristiques et performances de l'instrumentation développée sont résumées dans le tableau 3.2.

Les méthodes de reconstruction du doigt et procédures de calibration décrites jusqu'à maintenant constituent une base de travail permettant de reconstruire le contour et la position du centre d'un doigt sans aucune hypothèse sur sa géométrie. En effet, les mesures sont considérées comme indépendantes les unes des autres. En pratique, ce n'est bien sûr pas le cas : la géométrie du doigt ne varie pratiquement pas au cours d'un déplacement en espace libre. Les mesures des capteurs sont donc corrélées entre elles, ce qui se confirme expérimentalement : on constate sur

TABEAU 3.2: Résumé des caractéristiques de l'anneau développé dans ce chapitre.

Dimensions extérieures	$36 \times 48 \times 34$ mm
Diamètre interne	24 mm
Poids	80,2 g
Nombre de capteurs	16
Fréquence d'échantillonnage théorique	500 Hz
Précision de la reconstruction du centre du doigt	$0,3 \pm 0,3$ mm

la figure 3.15 que l'écart-type de l'erreur sur le centre du doigt est inférieur aux écarts-types des erreurs sur les mesures capteurs pris séparément (MONTGOMERY et RUNGER 2003). Tout emploi d'un modèle doit donc permettre d'améliorer les résultats quant à la précision de la reconstruction de la géométrie du doigt, ce qui est examiné dans le paragraphe suivant.

Enfin, les calibration et validation de l'anneau ont été ici effectuées en statique. Elles sont suffisantes pour juger de la précision de positionnement et reconstruction du dispositif, mais ne permettent pas d'évaluer le bruit des mesures en situation. Cet aspect est également étudié dans la suite de cette thèse.

3.6 Utilisation de l'effecteur pour le contact intermittent

L'effecteur présenté dans ce chapitre permet de mesurer précisément la géométrie du contour d'un doigt et sa position dans un plan de mesure. Les évaluations effectuées montrent que ces mesures ont une précision suffisante lors d'une utilisation avec seize capteurs actifs, quelle que soit la méthode de calibration utilisée et bien qu'aucun modèle ne soit utilisé pour recalibrer les mesures. Ces résultats ne sont cependant pas suffisants pour valider son utilisabilité sur une interface haptique à contacts intermittents. Il existe en effet des différences importantes dans ce cas : en premier lieu, le système sera utilisé dynamiquement. Par ailleurs, on pourra utiliser un nombre de capteurs et un modèle différents suivant ce que l'on désire mesurer (la forme du doigt ou uniquement sa position) et le temps disponible pour cela. Enfin, on pourra utiliser un modèle du doigt et/ou filtrer les données pour améliorer la précision et diminuer le niveau de bruit des mesures.

Dans un premier temps, on étudie la pertinence de différents modèles de doigt en évaluant leur capacité à améliorer la précision de la mesure à l'aide des données de la section précédente. On évalue ensuite l'apport d'un filtrage de type Kalman dans le cas du suivi du mouvement d'un doigt lorsque l'ensemble de ses capteurs est utilisé, puis huit, puis quatre.

3.6.1 Modélisation du contour d'un doigt

Lors de l'utilisation de l'anneau comme dispositif de suivi d'un doigt à contacts intermittents, la précision du contour du doigt et de son positionnement constituent des éléments importants. D'une part, ils améliorent la dynamique de suivi (COLGATE et BROWN 1994) qui sera d'autant meilleure que les mesures sont rapides, précises et peu bruitées. D'autre part, ils assurent que le contact, quand il est provoqué, a bien lieu où on le désire. Il peut être judicieux de recalibrer les mesures des différents capteurs les uns par rapport aux autres pour améliorer cette précision, plutôt que de les considérer comme indépendantes. Cela peut être fait en utilisant un modèle de

l'objet suivi (ici le doigt), pourvu que sa géométrie soit au moins partiellement connue. Deux modèles du contour du doigt sont envisagés ici à titre d'exemples :

- en première approximation, il peut être modélisé par un cercle. Dans ce cas on doit utiliser au moins trois capteurs, afin d'en acquérir le rayon R_f et les coordonnées (x_c, y_c) de son centre dans le repère de l'anneau ;
- en seconde approximation, il peut être modélisé par une ellipse. Dans ce cas, au moins cinq capteurs sont nécessaires pour acquérir les coordonnées de son centre (x_e, y_e) , son orientation θ et ses demi-axes a et b .

L'optimisation géométrique des paramètres de ces deux modèles consiste en la minimisation de la somme des carrés des distances des points du modèle aux points de mesure. Elle est idéalement réalisée par des optimisations aux moindres carrés non linéaires (AHN, RAUH et WARNECKE 2001 ; GANDER, GOLUB et STREBEL 1994) basées sur des algorithmes itératifs coûteux en temps de calcul, dont on cherche à éviter l'emploi ici pour garantir une fréquence d'échantillonnage suffisante pour une application haptique (environ 1 kHz). La principale alternative est l'optimisation algébrique (CHERNOV et LESORT 2005 ; FITZGIBBON, PILU et FISHER 1999), où l'on s'intéresse à la détermination des paramètres de l'équation algébrique du modèle. Elle est moins précise, et constitue généralement la condition initiale des algorithmes géométriques. Cependant on la privilégie ici en supposant que les données sont suffisamment bien conditionnées pour qu'elle fournisse une bonne estimée de la géométrie du doigt.

En reprenant les équations de (CHERNOV et LESORT 2005) et (FITZGIBBON, PILU et FISHER 1999), on définit chaque modèle par une équation algébrique $F(\mathbf{x}, \mathbf{a}) = 0$ et une contrainte sur ses paramètres \mathbf{a} :

- **Modélisation par un cercle** : Pour un point de coordonnées (x, y) appartenant au cercle, l'équation algébrique s'écrit :

$$A(x^2 + y^2) + Bx + Cy + D = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x}^T \mathbf{a} = 0 \quad (3.14)$$

avec $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x^2 + y^2 & x & y & 1 \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{a} = \begin{bmatrix} A & B & C & D \end{bmatrix}^T$. Si cette équation modélise un cercle, elle est alors équivalente à :

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R_f^2 \Leftrightarrow x^2 + y^2 - 2xx_c - 2yy_c = R_f^2 - x_c^2 - y_c^2 \quad (3.15)$$

En identifiant terme à terme par rapport à l'équation précédente, on obtient donc :

$$x_c = -\frac{B}{2A} \quad y_c = -\frac{C}{2A} \quad R_f = \sqrt{\frac{B^2 + C^2 - 4AD}{4A^2}} \quad (3.16)$$

Nous en déduisons que l'équation 3.14 est celle d'un cercle si l'inégalité suivante est respectée :

$$B^2 + C^2 - 4AD > 0 \quad (3.17)$$

Cette inégalité peut se mettre sous la forme de la contrainte quadratique suivante :

$$\mathbf{a}^\top \mathbf{C}_c \mathbf{a} = 1 \text{ avec } \mathbf{C}_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

- **Modélisation par une ellipse** : De la même manière, pour un point de coordonnées (x,y) appartenant à l'ellipse, on peut écrire $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x^2 & xy & y^2 & x & y & 1 \end{bmatrix}^\top$ et le vecteur des paramètres est $\mathbf{a} = \begin{bmatrix} A & B & C & D & E & F \end{bmatrix}^\top$. L'équation algébrique correspondante est :

$$\mathbf{x}^\top \mathbf{a} = 0 \quad (3.19)$$

La contrainte quadratique s'écrit :

$$\mathbf{a}^\top \mathbf{C}_e \mathbf{a} = 1 \text{ avec } \mathbf{C}_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Ces paramètres sont reliés aux paramètres géométriques de l'ellipse par les relations

$$\begin{aligned} x_e &= \frac{BE-2DC}{4AC-B^2} & y_e &= \frac{BD-2EA}{4AC-B^2} & \theta &= \frac{1}{2} \text{Arctan} \left(\frac{B}{C-A} \right) \\ a &= \sqrt{\frac{-\bar{C}}{\lambda_1}} & b &= \sqrt{\frac{-\bar{C}}{\lambda_2}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

avec :

- les valeurs propres λ_1 et λ_2 de la matrice $\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} A & B/2 \\ B/2 & C \end{bmatrix}$;
- la variable $\bar{C} = \begin{bmatrix} x_e & y_e \end{bmatrix} \bar{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} x_e & y_e \end{bmatrix}^\top + \begin{bmatrix} D & E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_e & y_e \end{bmatrix}^\top + F$.

Application à l'estimation du doigt

On reprend ici les données expérimentales enregistrées au paragraphe 3.5.2. Pour chacune des 75 acquisitions réalisées avec l'appareil photo, une optimisation aux moindres carrés est effectuée sur les paramètres du modèle elliptique. Elle aboutit à une précision de reconstruction de $0 \pm 0,2$ mm au niveau des seize points de mesure, ce qui prouve que la géométrie du contour du doigt est correctement estimée par une ellipse. De façon similaire, les paramètres des modèles

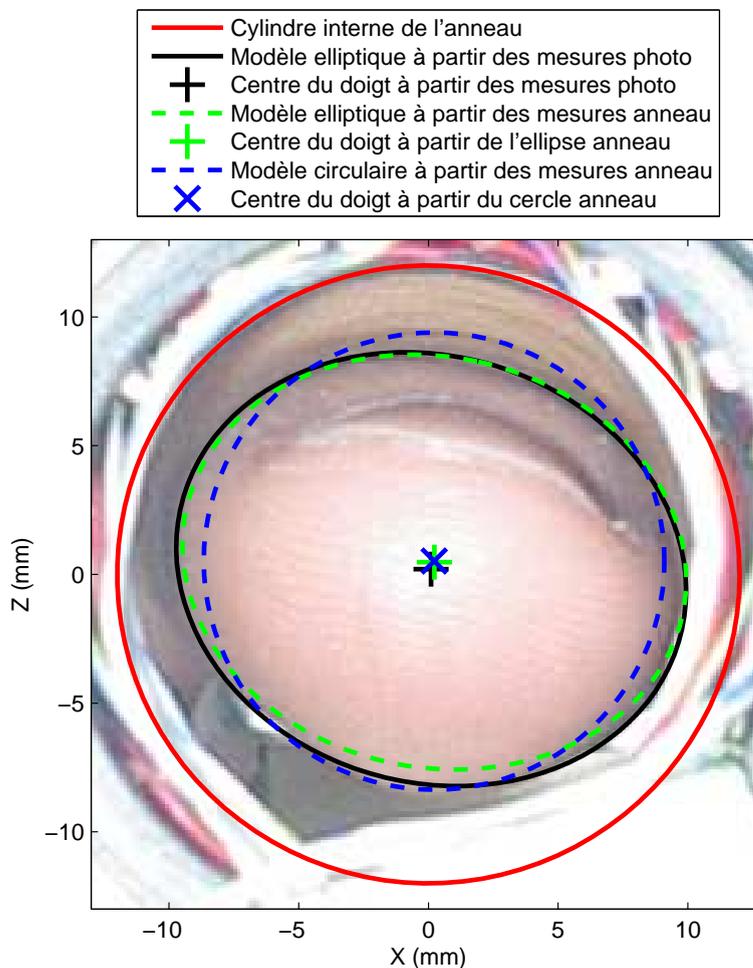


FIGURE 3.16: Exemple d'erreurs d'estimation de la géométrie du doigt à partir de seize mesures issues de l'anneau combinées à deux modélisations géométriques différentes.

circulaire et elliptique sont optimisés à partir des mesures issues de l'anneau dans le cas de l'utilisation de seize, huit et quatre capteurs.

La figure 3.16 présente l'approximation du doigt par une ellipse générée à partir des mesures extraites de la photographie de la figure 3.13. En parallèle, nous recalons les modèles circulaire et elliptique sur les seize points de mesure issus de l'anneau. On constate que, sans surprise, le modèle elliptique optimisé à partir des mesures de l'anneau correspond à la photographie, avec une précision de reconstruction de $0,3 \pm 0,3$ mm sur la géométrie du doigt. Cette dernière est moins bien approximée par le modèle circulaire, avec une précision de reconstruction de $0,3 \pm 0,6$ mm. Le centre du doigt est quant à lui reconstitué avec la même précision de $0 \pm 0,3$ mm quelle que soit la modélisation utilisée (les deux modèles sont élaborés à partir des mêmes mesures et exploitent la même méthode d'optimisation).

TABLEAU 3.3: Précisions d'estimation de la géométrie réelle du doigt par des ellipses et cercles en fonction du nombre de capteurs, sur les 75 acquisitions effectuées. La modélisation du doigt par une ellipse, qui comporte cinq paramètres, est inaccessible avec quatre capteurs.

Nombre de capteurs	16	8	4
Modèle elliptique			
$\mathcal{E}_{x,e}$ (mm)	$0,14 \pm 0,23$	$0,06 \pm 0,28$	\emptyset
$\mathcal{E}_{y,e}$ (mm)	$0,14 \pm 0,18$	$0,03 \pm 0,22$	\emptyset
\mathcal{E}_θ (mrad)	$0,04 \pm 0,30$	$0,07 \pm 0,35$	\emptyset
\mathcal{E}_a (mm)	$0,33 \pm 0,30$	$0,13 \pm 0,37$	\emptyset
\mathcal{E}_b (mm)	$0,17 \pm 0,24$	$0,39 \pm 0,29$	\emptyset
Modèle circulaire			
$\mathcal{E}_{x,c}$ (mm)	$0,10 \pm 0,23$	$0,01 \pm 0,24$	$0,38 \pm 0,60$
$\mathcal{E}_{y,c}$ (mm)	$0,07 \pm 0,23$	$0,11 \pm 0,32$	$0,15 \pm 0,35$
\mathcal{E}_{R_f} (mm)	$0,19 \pm 0,82$	$0,21 \pm 0,83$	$0,22 \pm 0,87$

TABLEAU 3.4: Écarts-types σ des mesures sur les paramètres des modélisations du paragraphe 3.6.1 dans le cas de mesures effectuées avec une sphère de MoCap maintenue immobile. La modélisation par une ellipse, qui comporte cinq paramètres, est inaccessible avec quatre capteurs. Par ailleurs, l'écart-type sur l'orientation σ_θ n'est pas évalué car il n'a pas de sens dans le cas de la reconstruction de la coupe d'un objet sphérique.

Modèle elliptique	16 capteurs	8 capteurs	4 capteurs
$\sigma_{x,e}$ (μm)	24	37	\emptyset
$\sigma_{y,e}$ (μm)	26	20	\emptyset
σ_θ (mrad)	\emptyset	\emptyset	\emptyset
σ_a (μm)	31	35	\emptyset
σ_b (μm)	31	35	\emptyset
Modèle circulaire	16 capteurs	8 capteurs	4 capteurs
$\sigma_{x,c}$ (μm)	26	36	54
$\sigma_{y,c}$ (μm)	26	21	65
σ_{R_f} (μm)	19	21	42

Les mêmes procédés de reconstruction sont appliqués à l'ensemble des 75 acquisitions réalisées dans le cas de l'utilisation de seize, huit et quatre capteurs. La précision des estimations de la géométrie et du centre du doigt par rapport aux données issues de la photo sont rassemblées dans le tableau 3.3. On constate que les résultats obtenus sont similaires dans le cas de l'utilisation de seize et huit capteurs, tandis que le centre du doigt est moins bien approximé dans le cas de l'utilisation de quatre capteurs et d'un modèle circulaire.

Les écarts-types du tableau 3.3 montrent que les mesures sont dispersées. Afin d'évaluer ces dispersions plus en détail, on maintient la sphère de MoCap immobile dans l'anneau et sa position est enregistrée pendant dix secondes dans les configurations quatre, huit et seize capteurs. On effectue une régression aux moindres carrés sur les points de mesure obtenus afin d'en extraire les paramètres des modèles circulaire et elliptique à chaque pas de calcul. On suppose que les bruits sont normaux et de moyenne nulle. Les valeurs des écarts-types correspondants sont données dans le tableau 3.4.

Le résultat est conforme à l'intuition : on remarque que les écarts-types obtenus sont contenus avec seize capteurs (26 μm en moyenne). Ils croissent faiblement avec l'emploi de huit capteurs

(29 μm en moyenne), et de manière plus prononcée en n'utilisant que quatre capteurs (53 μm en moyenne). Par ailleurs, conformément à ce qui a été observé dans le paragraphe précédent, on ne gagne pas significativement sur la précision de l'estimation du positionnement du doigt en utilisant l'un ou l'autre des deux modèles. Nous examinons maintenant le filtrage de ces données.

3.6.2 Filtrage dynamique

Les études précédentes ont été effectuées en statique. Or il apparaît que les mesures sont également dispersées dans le temps, comme le montre le tableau 3.4. Cette dispersion peut être atténuée au moyen d'un filtre de Kalman par exemple (GREWAL et ANDREWS 2001) qui a l'avantage d'introduire beaucoup moins de retard qu'un filtre passe-bas et est peu demandeur en termes de temps de calcul. Puisque les paramètres qui régissent le mouvement du doigt sont inconnus, la représentation d'état de son contour se réduit à :

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1|k} &= \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}_{k|k} \\ \mathbf{y}_{k|k} &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}_{k|k} \end{cases} \quad (3.22)$$

avec \mathbf{x}_k l'état du système et \mathbf{y}_k la mesure à l'instant k , \mathbf{F} et \mathbf{C} les matrices d'état et d'observation respectivement, toutes deux constantes. Comme la fréquence du mouvement du doigt est très petite devant la fréquence d'échantillonnage du contrôleur, on considère qu'entre deux pas de calcul l'accélération du doigt est constante. Nous choisissons donc comme variables d'état les coordonnées x et y du centre du doigt, leurs dérivées premières \dot{x} , \dot{y} , leurs dérivées secondes \ddot{x} , \ddot{y} et les paramètres constants de la modélisation choisie (R_f dans le cas d'une modélisation circulaire ; a et b dans le cas d'une modélisation elliptique). Les équations du filtre de Kalman sont rappelées sur la figure 3.17.

Pour ces calculs, on fait l'hypothèse que les variables sont indépendantes. De plus, l'estimée de l'état initial $\hat{\mathbf{x}}_{0|0}$ est nulle et la matrice de covariance de l'erreur de prédiction $\mathbf{P}_{0|0}$ est initialisée à l'identité. On a donc la représentation d'état suivante, par exemple dans le cas d'une

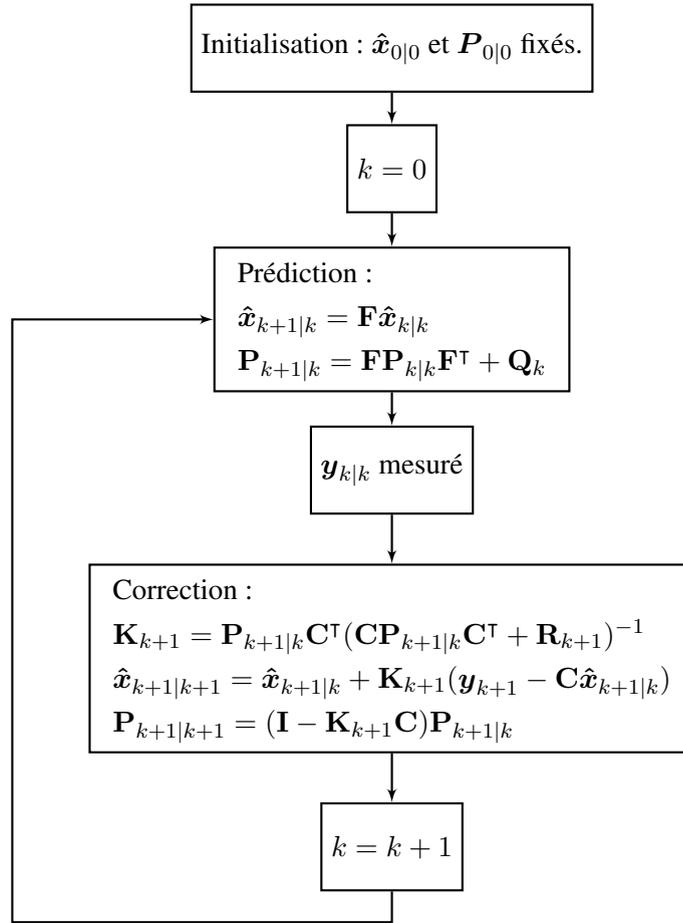


FIGURE 3.17: Équations du filtre de Kalman (BELLOT et MECHBAL 2010). \mathbf{Q}_k : matrice de covariance du bruit de processus. \mathbf{R}_{k+1} : matrice de covariance du bruit de mesure. \mathbf{K}_k : gain de Kalman.

modélisation par un cercle :

$$\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ R_f \end{bmatrix}_{k+1|k} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & T^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ R_f \end{bmatrix}_{k|k} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ R_f \end{bmatrix}_{k|k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ R_f \end{bmatrix}_{k|k}$$

Les matrices de covariance du bruit de mesure \mathbf{R}_e et \mathbf{R}_c (pour les modèles elliptique et circulaire, respectivement) sont donc diagonales. On en déduit leur expression pour chaque modèle, en fonction du nombre de capteurs utilisés :

$$\mathbf{R}_e = \begin{bmatrix} \sigma_{x,e}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y,e}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\theta^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_b^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_c = \begin{bmatrix} \sigma_{x,c}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y,c}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_R^2 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

3.6.3 Communication avec le contrôleur

Le temps de cycle théorique de l'instrumentation décrite dans ce chapitre est de 1985 ms avec seize capteurs actifs. Or, nous constatons expérimentalement qu'il existe de petites variations dans le temps de traitement des données et les communications. Dans le cas de l'utilisation d'un contrôleur temps réel à 1 kHz et de mesures synchrones (voir paragraphe 3.3.3 et chronogramme 3.5), il arrive qu'en pratique la marge de 15 μ s existant entre la fin du cycle de mesure de l'instrumentation et la fin du cycle d'asservissement du contrôleur ne soit pas suffisante. Cela se traduit par une erreur. Pour pallier le problème, la prise en compte des données d'acquisition est retardée jusqu'au cycle contrôleur suivant : l'instrumentation est ainsi exploitée à 333 Hz seulement avec seize capteurs.

Des essais supplémentaires ont été effectués en faisant varier le nombre de capteurs actifs pour voir son influence sur la fréquence d'acquisition des mesures. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.5.

Ces fréquences d'acquisition ont un impact direct sur le retard de l'instrumentation. En effet, l'ordonnancement mis en place au paragraphe 3.3.3 impose que les mesures renvoyées au contrôleur à un cycle d'acquisition donné correspondent en réalité à l'enregistrement effectué deux cycles d'acquisition en arrière. Leur prise en compte est importante pour le réglage des filtres de Kalman, comme on le verra par la suite.

TABLEAU 3.5: Taux de rafraîchissement de l'anneau en fonction du nombre de capteurs actifs (contrôleur à 1 kHz et mesures synchrones).

Capteurs actifs	16	8	4
Fréquence théorique (Hz)	504	766	1036
Fréquence en pratique (Hz)	333	500	1000
Retard d'acquisition (ms)	6	4	2

TABLEAU 3.6: Précisions d'estimation de la géométrie du doigt par rapport à l'estimation réelle obtenue par filtrage non causal et application des retards d'acquisition, en fonction des variations du nombre de capteurs et modélisation.

Nombre de capteurs	16	8	4
Taux de rafraîchissement (Hz)	333	500	1000
Retard d'acquisition (ms)	6	4	2
Modèle elliptique			
$\mathcal{E}_{x,e}$ (mm)	$0 \pm 0,09$	$0 \pm 0,14$	\emptyset
$\mathcal{E}_{y,e}$ (mm)	$0 \pm 0,12$	$0 \pm 0,11$	\emptyset
\mathcal{E}_θ (mrad)	$0 \pm 0,09$	$0 \pm 0,36$	\emptyset
\mathcal{E}_a (mm)	$0 \pm 0,14$	$0 \pm 0,15$	\emptyset
\mathcal{E}_b (mm)	$0 \pm 0,12$	$0 \pm 0,13$	\emptyset
Modèle circulaire			
$\mathcal{E}_{x,c}$ (mm)	$0 \pm 0,09$	$0 \pm 0,14$	$0 \pm 0,08$
$\mathcal{E}_{y,c}$ (mm)	$0 \pm 0,13$	$0 \pm 0,10$	$0 \pm 0,08$
\mathcal{E}_{R_f} (mm)	$0 \pm 0,12$	$0 \pm 0,10$	$0 \pm 0,10$

3.6.4 Influence du nombre de capteurs sur l'estimation de la géométrie du doigt

Pour évaluer les performances de l'instrumentation proposée, un doigt est déplacé à travers tout l'espace de mesure de l'anneau pour les trois configurations d'acquisition décrites dans le tableau 3.5. Des enregistrements de 30 s sont réalisés à chaque fois. Le comportement réel du doigt est estimé a posteriori par un filtre passe-bas non causal (OPPENHEIM et SCHAFER 1989), dont la fréquence de coupure est réglée à 30 Hz pour la position du centre du doigt et son orientation dans le plan de mesure, et 5 Hz pour ses dimensions⁴. Les mesures obtenues sont finalement décalées du retard d'acquisition correspondant au nombre de capteurs utilisés. En l'absence de système externe de mesure dynamique de la position et de la géométrie du doigt, il s'agit de la meilleure estimée qu'on puisse en avoir. Elle approxime toutefois la réalité moyennant les erreurs statiques décrites dans le tableau 3.3.

Le filtre de Kalman présenté au paragraphe 3.6.2 est mis en œuvre en utilisant un modèle circulaire d'une part, elliptique d'autre part. Le tableau 3.6 présente les résultats obtenus en termes de précisions d'estimation de la géométrie du doigt après réglage des matrices de bruit de processus pour les trois configurations différentes. Il permet de juger de la performance du filtre de Kalman utilisé pour l'estimation des paramètres géométriques du doigt. On remarque que les trois configurations permettent d'aboutir à des performances relativement similaires. Les positions des centres du doigt sont reconstruites de manière satisfaisante, avec une précision n'excédant pas $0 \pm 0,14$ mm quel que soit le nombre de capteurs ou le modèle utilisés. De même, en comparant les modèles au travers de leurs points d'intersection avec les directions de mesure des capteurs, la géométrie du doigt est estimée avec une précision de $0 \pm 0,15$ mm avec le modèle elliptique, et $0 \pm 0,12$ mm avec le modèle circulaire.

4. Les dimensions du doigt dans le plan de mesure ne sont pas fixes : en effet, son contour peut varier en fonction de sa pénétration dans l'anneau.

TABLEAU 3.7: Précisions absolues de l'instrumentation, en fonction du nombre de capteurs actifs et de la modélisation utilisée.

Nombre de capteurs	16	8	4
Taux de rafraîchissement (Hz)	333	500	1000
Retard d'acquisition (ms)	6	4	2
Modèle elliptique			
$\mathcal{E}_{x,e}$ (mm)	$0,14 \pm 0,32$	$0,06 \pm 0,42$	\emptyset
$\mathcal{E}_{y,e}$ (mm)	$0,14 \pm 0,40$	$0,03 \pm 0,33$	\emptyset
\mathcal{E}_θ (mrad)	$0,04 \pm 0,70$	$0,07 \pm 0,82$	\emptyset
\mathcal{E}_a (mm)	$0,33 \pm 0,58$	$0,13 \pm 0,66$	\emptyset
\mathcal{E}_b (mm)	$0,17 \pm 0,51$	$0,39 \pm 0,59$	\emptyset
Modèle circulaire			
$\mathcal{E}_{x,c}$ (mm)	$0,10 \pm 0,32$	$0,01 \pm 0,38$	$0,38 \pm 0,68$
$\mathcal{E}_{y,c}$ (mm)	$0,07 \pm 0,36$	$0,11 \pm 0,42$	$0,15 \pm 0,43$
\mathcal{E}_R (mm)	$0,19 \pm 0,94$	$0,21 \pm 0,93$	$0,22 \pm 0,97$

Ces précisions relatives s'ajoutent aux précisions statiques du tableau 3.3 pour former les précisions absolues de l'instrumentation, présentées dans le tableau 3.7.

On conclut finalement que les disparités en termes de nombre de capteurs et fréquence de rafraîchissement sont efficacement compensées par le filtrage. La géométrie du doigt est ainsi correctement estimée dans toutes les configurations.

3.6.5 Transposition des résultats à trois dimensions

D'après le paragraphe 3.6.4, le nombre de capteurs à intégrer dans l'interface peut être diminué sans dégrader les performances du suivi du centre et l'estimation de la géométrie du doigt en se basant sur un modèle. Cela peut cependant être réalisé dans les limites suivantes :

- Le nombre de paramètres minimal du modèle doit être inférieur ou égal au nombre de capteurs non placés sur le même axe de mesure pour que la reconstruction du doigt soit possible.
- Le nombre de capteurs doit être suffisant pour garantir que quel que soit le positionnement du doigt dans l'anneau, son estimation reste conforme à la réalité. Cette limitation est illustrée sur la figure 3.18. On représente un index, de périmètre minimal 46,8 mm pour une femme adulte (GREINER 1991), par une ellipse (en bleu) de demi-grand et petit axes 16,4 et 13,2 mm respectivement. On le place dans l'anneau de telle manière qu'il coupe le moins possible le champ de vision des capteurs, tout en faisant varier le nombre de ces derniers. Dans la situation de la configuration (a) à trois capteurs, de petites variations de la position du doigt selon l'horizontale font faiblement varier les sorties des capteurs, mais une petite variation de la sortie du capteur C_1 se traduit par une grande variation de l'estimation du rayon du doigt. La situation de la configuration (b) à quatre capteurs est moins défavorable, car l'estimation du doigt s'appuie sur une mesure supplémentaire.

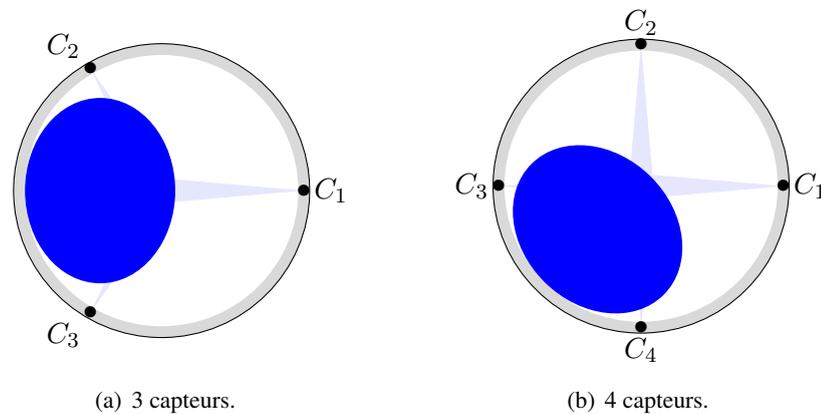


FIGURE 3.18: Représentation à l'échelle 1.5 de l'espace de l'anneau couvert par le champ de vision des capteurs. Gris : anneau. Bleu ciel : champ de vision des capteurs. Bleu foncé : doigt. Situation (a) : une faible variation de la sortie du capteur C_1 se traduit par une forte variation de l'estimation du doigt qui peut déstabiliser le système. Situation (b) : l'emploi de quatre capteurs contribue à stabiliser l'estimation par l'adjonction d'une mesure supplémentaire.

- le nombre de capteurs maximal est contraint par l'espace disponible autour du cylindre interne de l'effecteur, et par l'ordonnement des mesures et les communications en regard du temps de cycle.

Ces limites se transposent telles quelles dans le cas d'un effecteur adapté au suivi du doigt dans les trois dimensions de l'espace (figures 3.19 et 3.20). Ainsi, neuf capteurs sont par exemple suffisants pour reconstruire la position d'une phalange distale modélisée par un cylindre et terminée par une demi-sphère (cette modélisation étant symétrique de révolution, ses dimensions et sa position sont régies par six paramètres). Afin de maximiser l'espace de travail, ceux-ci peuvent être disposés de telle sorte que l'épaisseur de l'effecteur soit minimisée sur les côtés et le dessous du doigt. Une attention particulière devra être portée au champ de vision du capteur placé dans le prolongement de l'axe de la phalange distale, afin que celui-ci soit suffisant pour suivre le doigt en toutes circonstances. Enfin, l'électronique d'acquisition devra être rendue suffisamment robuste pour écarter tout risque de mise en défaut de l'un des capteurs, ou au moins comporter un mode de fonctionnement dégradé qui garantisse la sécurité de l'utilisateur.

3.7 Conclusion et perspectives

Ce chapitre décrit les étapes qui ont conduit à la conception d'un système de mesure adapté au suivi dynamique d'un doigt en 2D, à faible distance et sans contact. Le cahier des charges du système a été défini à partir d'une simulation unidimensionnelle de son fonctionnement. Une courte revue des technologies de capteurs permettant de mesurer à distance à la peau avec un taux de rafraîchissement élevé (supérieur à 300 Hz), un champ de vision court (0–10 mm), sans contact, sans marqueur et pour un encombrement réduit, a permis de sélectionner une solution

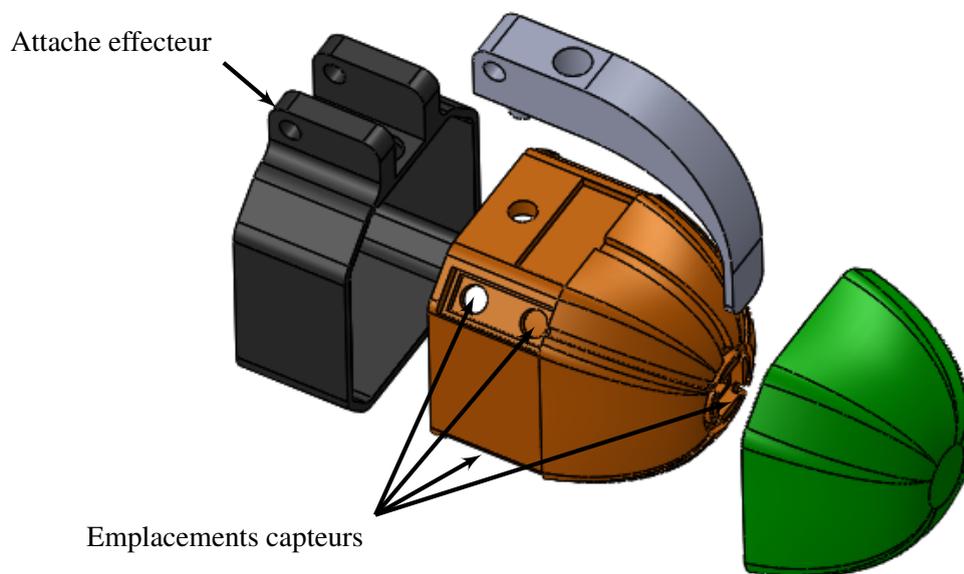


FIGURE 3.19: Vue éclatée d'une conception d'effecteur indicative pour le suivi d'un doigt dans toutes les directions de l'espace.

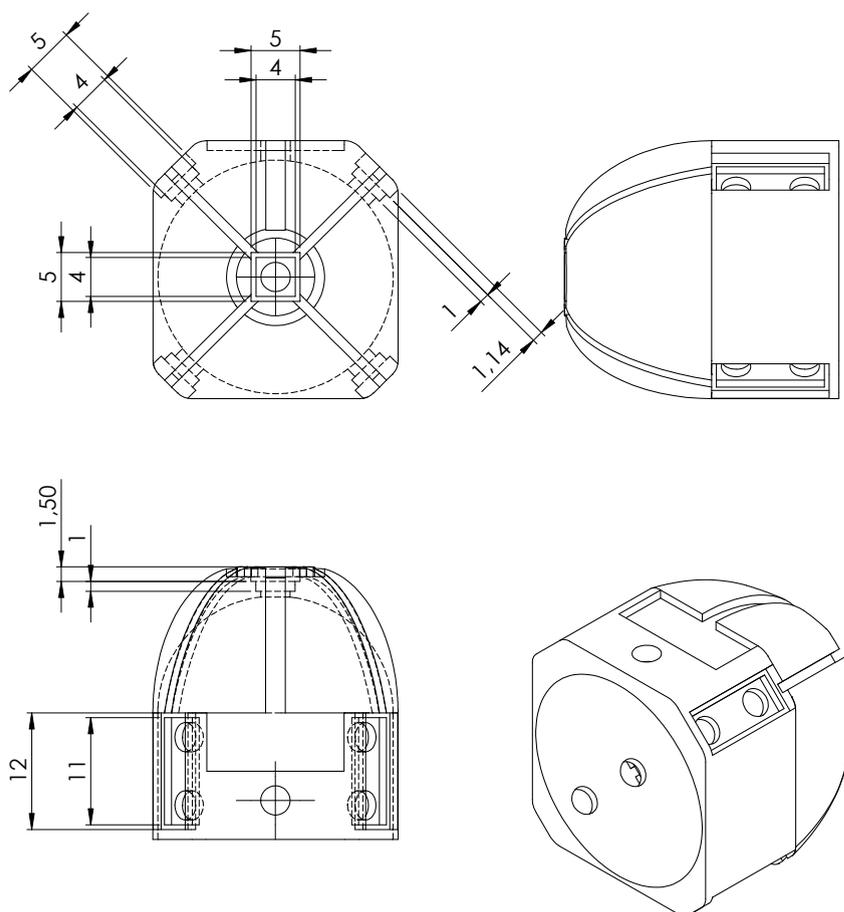


FIGURE 3.20: Plan de la garniture interne de l'effecteur 3D indicatif. Neuf capteurs sont intégrés à sa conception.

basée sur des capteurs de proximité infrarouges. Une instrumentation 2D complète capable de mesurer précisément le contour local d'une vue en coupe d'un doigt a été élaborée. Ce dispositif utilise 16 capteurs identiques dont l'un a été entièrement caractérisé en portant une attention particulière à la facilité d'utilisation du dispositif et notamment à sa calibration, de façon à ce que les performances soient indépendantes de l'utilisateur. L'effecteur complet a ensuite été calibré en utilisant un réflecteur sphérique rigide de Motion Capture, dont la réflectance à la longueur d'onde d'émission des capteurs est proche de celle d'un doigt moyen. Une procédure de calibration simple est établie pour que tout utilisateur puisse utiliser l'effecteur. À partir des résultats obtenus, des décalages sont calculés et propagés aux autres capteurs de façon à ce que chacun mesure précisément la distance le séparant du doigt. La validation des performances de l'interface est effectuée par une comparaison des contours des doigts de six utilisateurs, reconstruits de deux manières différentes (par l'anneau et par un appareil photo), tout d'abord près du centre de l'anneau, puis à travers son espace de mesure. Finalement, l'apport d'une modélisation du doigt et d'un filtrage des mesures en termes de précision et filtrage du bruit est examiné en fonction du nombre de capteurs actifs au sein du dispositif, aboutissant à des performances égales quel que soit le nombre de capteurs utilisés. Il en résulte une instrumentation facile d'utilisation, permettant le suivi d'un doigt dans un plan avec une fréquence d'échantillonnage variant entre 333 à 1000 Hz et une précision du positionnement du centre du doigt de $0,3 \pm 0,2$ mm dans un espace de travail de 24 mm de diamètre. Entre quatre et seize mesures donnent accès à la géométrie du doigt dans un plan de coupe avec une précision variant en fonction du modèle utilisé.

Les résultats obtenus permettent d'envisager plusieurs perspectives aux travaux réalisés. Tout d'abord, le paragraphe 3.6 montre qu'un faible nombre de capteurs peut être utilisé pour reconstruire la position du centre du doigt et sa géométrie dans le plan de l'anneau, moyennant quelques précautions à prendre quant à la sécurité du système. Cela laisse penser que les résultats doivent être transposables à un effecteur adapté à trois dimensions. Par ailleurs, comme la géométrie du doigt est peu changeante au cours de l'utilisation du dispositif, les mesures capteurs co-varient. En effet, elles sont plus nombreuses que le nombre de paramètres qui causent leur variation. En modélisant le contour du doigt (ce qui permet de relier les mesures capteurs les unes aux autres), une autocalibration de l'anneau est a priori possible. Cependant, comme le modèle de Phong utilisé pour traduire les sorties capteurs en une distance est non linéaire, la résolution du système d'équations qui en résulte nécessite de prendre en compte de nombreux instants précédents. Des méthodes itératives peuvent a priori être utilisées (BERTSEKAS 1999 ; KELLEY 1999) mais elles présentent l'inconvénient d'être coûteuses en temps de calcul. Il semble plus indiqué de mener l'optimisation dynamiquement – le choix de la méthode reste cependant ouvert.

Chapitre 4

Commande d'un dispositif à contacts intermittents

4.1 Introduction

Une interface haptique à contacts intermittents doit présenter une mécanique et une électronique adaptées. Elle doit également être commandée par une loi qui lui permette d'assurer sa fonction dans toutes les phases de son fonctionnement. En espace libre, elle doit suivre le doigt de l'utilisateur à distance. Au contact, elle doit lui restituer des efforts en accord avec les interactions de l'avatar du doigt avec l'environnement. Ces deux modes de fonctionnement doivent être assurés en garantissant que la transition entre les deux préserve le réalisme de l'interaction avec l'environnement virtuel.

Ce chapitre analyse ces différentes phases de fonctionnement et examine plusieurs solutions pour réaliser la transition entre espace libre et contact. L'infrastructure expérimentale est d'abord présentée. Les lois de commande du robot sont ensuite implémentées expérimentalement et les performances de la meilleure solution sont détaillées. Finalement, nous comparons la capacité de dix utilisateurs à détecter un contact avec l'interface à contacts intermittents et avec une interface classique en contact permanent avec le doigt.

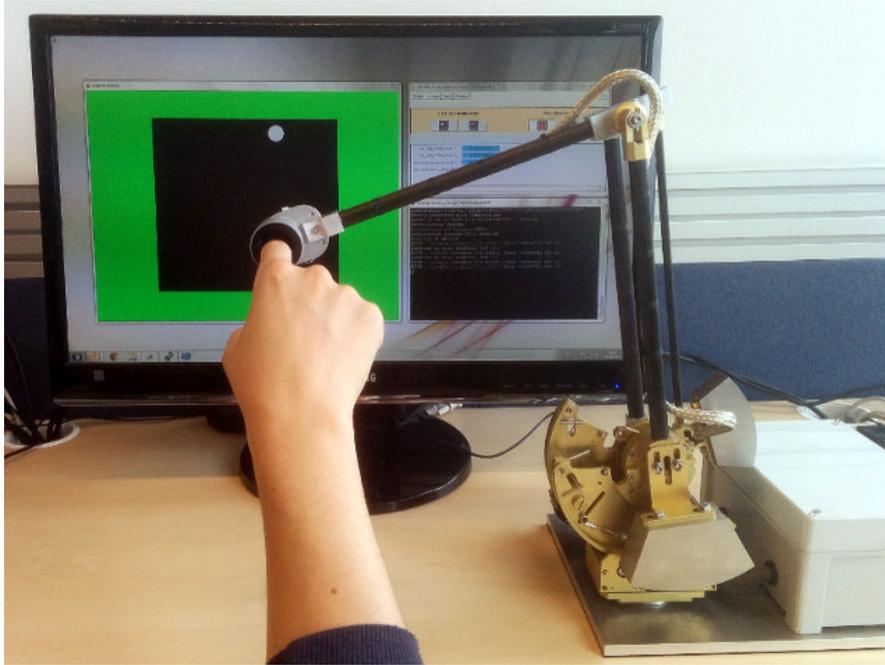


FIGURE 4.1: Vue générale de l'interface haptique à contacts intermittents 2D utilisée pendant les expérimentations. Le monde virtuel 2D apparaît à l'arrière-plan : l'avatar du doigt est représenté par un disque blanc, l'espace libre apparaît en noir et les murs virtuels en vert.

4.2 Infrastructure expérimentale

Nous avons élaboré une interface à contacts intermittents à partir d'un robot deux axes, au bout duquel nous avons placé un effecteur pour le contact intermittent similaire à celui présenté dans le chapitre précédent. Nous présentons ici cette infrastructure expérimentale et l'environnement virtuel qui lui est associé. Ils sont utilisés tout au long de ce chapitre.

4.2.1 Description du robot et estimation de la position du doigt

Nous utilisons une interface haptique 2D série. Il s'agit d'une version optimisée d'une sous-structure 2D, provenant d'un robot parallèle à six degrés de liberté disponible au laboratoire (GOSSELIN, BIDARD et BRISSET 2005). Ses performances permettent de simuler des tâches de manipulation fine, pour lesquelles la restitution de contacts réalistes est nécessaire. Son espace de travail est contenu dans un plan vertical (figure 4.1). Il est actionné par deux moteurs à courant continu de type Maxon RE-35. Leurs positions sont déterminées à l'aide de codeurs optiques incrémentaux d'une résolution de 1000 points par tour. Pour amplifier les efforts des moteurs, nous utilisons des réducteurs à cabestan et câbles. Les deux axes du robot sont équilibrés passivement par des masses excentrées. La gravité n'est donc pas perçue par l'utilisateur. Ces technologies garantissent au robot une grande réversibilité mécanique. Sa structure n'embarque donc pas de capteur d'effort.

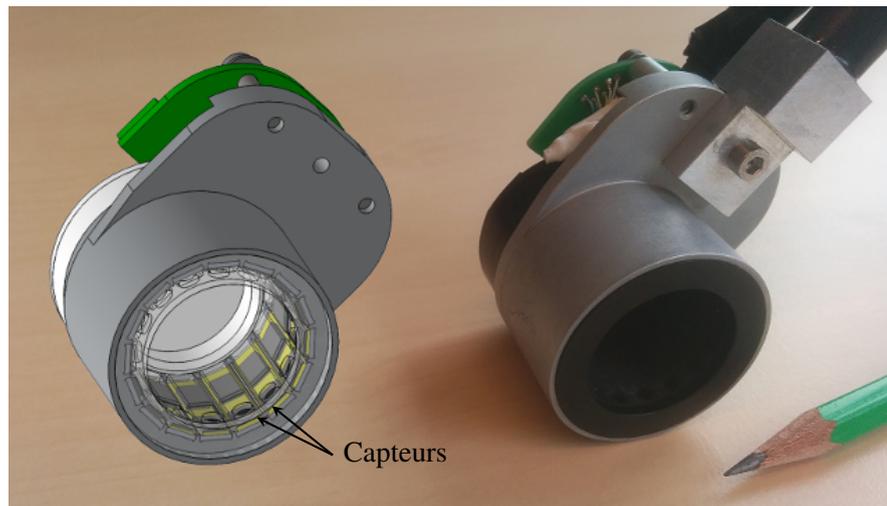


FIGURE 4.2: CAO et vue rapprochée de l'effecteur utilisé dans ce chapitre.

Ce robot est terminé par un effecteur similaire à celui dont la conception a été présentée au chapitre précédent (figure 4.2). Sa structure mécanique a été allégée : il ne pèse que 53 g. Il reprend la même électronique d'acquisition. Le câble de communication qui le relie à sa carte d'acquisition est blindé pour éviter toute perturbation électromagnétique issue des moteurs. La carte est installée à proximité du robot. Elle effectue le relais entre les capteurs, avec lesquels elle dialogue en I2C, et le contrôleur avec lequel quatre liaisons RS232 sont établies en parallèle. Huit capteurs sont utilisés. Leurs mesures sont donc rafraîchies à 500 Hz. Elles sont obtenues par le contrôleur avec 4 ms de retard.

Le contrôleur du robot est composé d'un ordinateur PC104 embarquant le système d'exploitation temps réel Xenomai et de variateurs pilotant les deux moteurs du robot. Un logiciel adapté, basé sur la librairie de télérobotique TAO¹ acquiert l'état de l'interface, en déduit sa position et celle du doigt, puis envoie aux variateurs les couples de référence à la fréquence de 1 kHz.

La position et la géométrie du doigt sont estimées par un filtre de Kalman à trois étages (position/vitesse/accélération) tel que présenté au paragraphe 3.6.2 : en fonction de la modélisation utilisée, les paramètres du modèle sont extraits des mesures capteurs. Les paramètres géométriques sont considérés constants tandis que la vitesse et l'accélération cartésiennes du doigt sont estimées à partir de la position de son centre par des dérivées arrières. Ce filtre permet d'estimer les paramètres de la modélisation du doigt à un instant donné à environ 1 mm près quelle que soit la modélisation choisie (voir tableau 3.7). Sa position par rapport à l'effecteur est ajoutée à la position de l'effecteur dans le repère de base pour aboutir à la position du doigt dans le repère de base. Cette dernière est enfin confrontée aux contraintes de l'environnement virtuel.

1. Téléopération Assistée par Ordinateur (GICQUEL et al. 2001) .

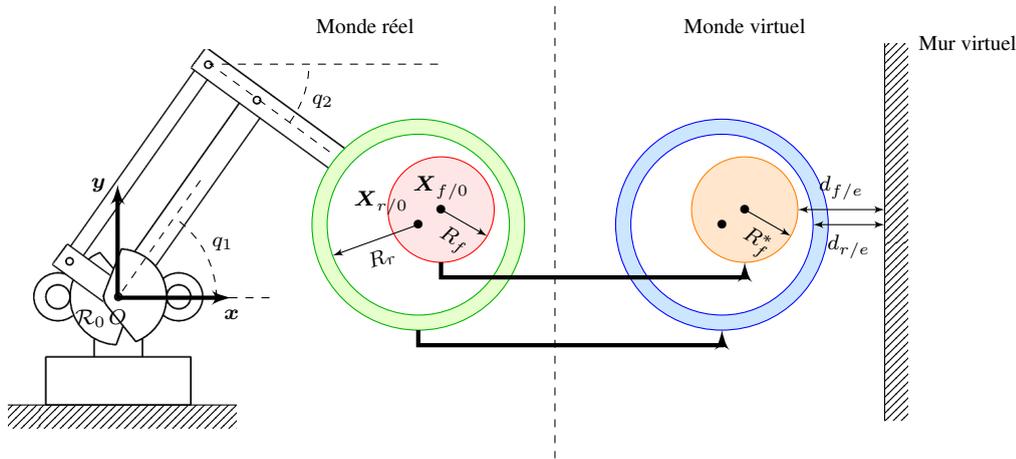


FIGURE 4.3: Interface haptique à contacts intermittents schématique avec repère de base, points de référence et avatars correspondants. Cercle vert : anneau. Disque rouge : doigt. Cercle bleu : avatar de l'anneau. Disque orange : avatar du doigt.

4.2.2 Tâche de réalité virtuelle

La tâche de réalité virtuelle considérée dans ce chapitre consiste à évoluer dans un espace libre rectangulaire de 150 mm de longueur et 200 mm de hauteur, bordé par des murs virtuels. Ceux-ci sont donc soit horizontaux, soit verticaux. Lorsque l'utilisateur se déplace dans l'espace libre, aucune contrainte ne lui est appliquée. Lorsqu'il arrive au contact d'un mur virtuel, un effort lui est restitué selon la normale au mur.

Par souci de simplification, dans ce chapitre, nous considérons les interactions entre l'utilisateur et le mur de droite de l'environnement virtuel, situé à une abscisse x_e . Le mouvement et les efforts seront observés selon la direction perpendiculaire au mur uniquement. Comme le doigt ne tourne pas pendant ce type de mouvement, les modélisations circulaire et elliptique sont équivalentes : nous choisissons ainsi de modéliser le doigt par un cercle.

On définit, dans l'environnement virtuel, un avatar de l'anneau et un avatar du doigt (voir figure 4.3). Chacun est lié rigidement à sa contrepartie réelle. On appelle $\mathcal{R}_0 = (xOy)$ le repère cartésien lié à la base du robot. Son origine est placée au centre de la première articulation du robot. Son axe x est horizontal et dirigé à droite, tandis que son axe y est vertical et dirigé vers le haut. Dans ce repère, on appelle $X_{r/0}$ et $X_{f/0}$ les positions des centres respectifs de l'effecteur du robot et du doigt dans le repère \mathcal{R}_0 . Elles sont calculées à partir des positions articulaires q_1 et q_2 déduites des positions moteurs fournies par les codeurs à travers un modèle géométrique. La position relative du centre du doigt par rapport à l'effecteur est dénotée $X_{f/r} = \begin{bmatrix} x_e & y_e \end{bmatrix}^T$. On appelle R_r le rayon de l'anneau, R_f le rayon du doigt et R_f^* le rayon de son avatar. Enfin, on appelle $d_{f/e}$ la pénétration de la périphérie de l'avatar du doigt dans le mur virtuel, et $d_{r/e}$ celle de la périphérie de l'avatar de l'anneau dans le mur virtuel.

4.3 Analyse des principaux modes de fonctionnement

On s'intéresse aux lois de commande correspondant au suivi de position en espace libre et à la restitution des efforts par le robot au contact. Toutes deux sont présentées et analysées dans la suite.

4.3.1 Suivi de position en espace libre

En espace libre, le robot a pour objectif de poursuivre le doigt de l'utilisateur à distance, grâce aux mesures obtenues par l'effecteur. Il a donc pour consigne de déplacer l'anneau pour que son centre soit confondu avec le centre du doigt. En reprenant les notations du paragraphe 4.2, il doit annuler l'erreur cartésienne :

$$\epsilon_X = \mathbf{X}_{f/0} - \mathbf{X}_{r/0} = \mathbf{X}_{f/r} \quad (4.1)$$

L'expression de l'erreur de positionnement et la synthèse du correcteur dans l'espace articulaire permettent plus de robustesse à la variation des couplages (PLUMET, MOREL et BIDAUD 1995). Si la dynamique du robot est suffisante, on peut faire l'hypothèse que ϵ_X est petite. Cette erreur peut donc être exprimée dans l'espace articulaire comme suit :

$$\epsilon_q = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \cdot \epsilon_X \quad (4.2)$$

avec $\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2]^T$ les paramètres articulaires du robot, $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ la jacobienne du robot qui relie la vitesse du centre de l'effecteur aux vitesses articulaires, exprimée dans le repère de référence, et ϵ_q l'erreur de positionnement articulaire.

Pour minimiser cette erreur, on utilise un correcteur Proportionnel-Dérivé. Cette solution est couramment utilisée sur les interfaces haptiques. Le correcteur fournit au robot un couple de référence τ_t :

$$\tau_t = \mathbf{Z}_t \cdot \epsilon_q = (\mathbf{K}_t + \mathbf{B}_t s) \cdot \epsilon_q \quad (4.3)$$

avec \mathbf{Z}_t l'impédance équivalente au correcteur, dont le gain proportionnel est \mathbf{K}_t et le gain dérivé \mathbf{B}_t . Il en résulte la loi de commande de la figure 4.4. Son équivalent mécanique est un couplage virtuel de type ressort-amortisseur entre le doigt et l'anneau (figure 4.5).

Implémentation expérimentale

Nous implémentons cette loi de commande sur le robot 2D décrit en introduction. Les gains de ce correcteur sont réglés expérimentalement de façon à obtenir un comportement satisfaisant du

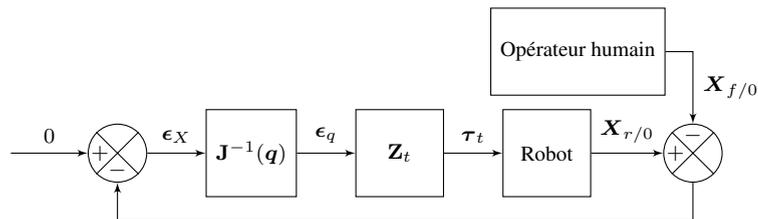


FIGURE 4.4: Loi de commande pour le suivi de position en espace libre.

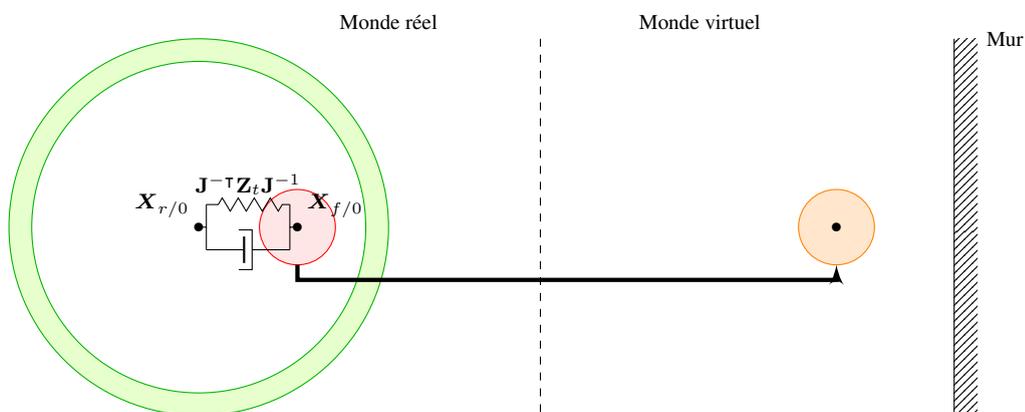


FIGURE 4.5: Équivalent mécanique de la loi de commande pour le suivi de position en espace libre – illustration dans un cas unidimensionnel. Vert : anneau. Rouge : doigt. Orange : avatar du doigt.

robot dans tout l'espace de travail :

$$\mathbf{K}_t = \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 40 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_t = \begin{bmatrix} 1,1 & 0 \\ 0 & 1,1 \end{bmatrix}$$

avec \mathbf{K}_t en Nm/rad et \mathbf{B}_t en Nms/rad. Ces gains correspondent à une raideur Cartésienne apparente de 640 N/m lorsque le robot se trouve dans sa configuration de référence où le bras et l'avant-bras sont perpendiculaires ($q_1 = 45^\circ$ et $q_2 = -45^\circ$).

Évaluation des performances

Nous évaluons les performances de l'interface haptique en suivi de position en traçant le diagramme de Bode du système asservi en plusieurs points de fonctionnement. Pour cela, on place une sphère de Motion Capture au centre de l'anneau. Celle-ci est immobile par rapport au bâti. Sa position est notée $\mathbf{X}_{s/0}$.

La consigne appliquée au système asservi est :

$$\mathbf{X}_{r/0,d} = \mathbf{X}_{s/0} + \begin{bmatrix} A_x \cdot \sin(2\pi f_x t) \\ A_y \cdot \sin(2\pi f_y t) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

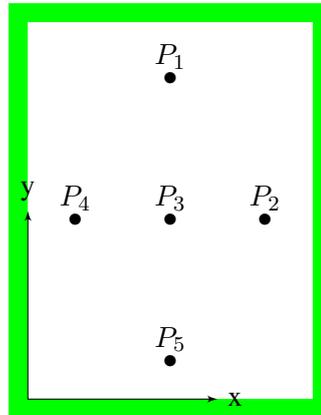


FIGURE 4.6: Espace de travail du robot tel que défini dans la simulation, et points de fonctionnement P_1 à P_5 considérés pour le tracé des diagrammes de Bode. La configuration de référence correspond au point P_5 . Dans cet espace de travail, $q_1 \in [6,5^\circ; 66,4^\circ]$ et $q_2 \in [-100,6^\circ; -45,6^\circ]$. Vert : murs virtuels.

avec A_x et A_y les amplitudes des sinusoides selon les deux directions de l'espace, f_x et f_y les fréquences du mouvement correspondantes et t le temps.

On place la sphère tout-à-tour en cinq points de fonctionnement P_1 à P_5 de l'espace de travail de la simulation (figure 4.6). Pour chaque point, la référence de position inclut d'abord des oscillations verticales, puis horizontales. Son enregistrement simultané avec la position de l'effecteur $\mathbf{X}_{r/0}$ permet de déduire le gain et la phase du système asservi. Les diagrammes de Bode résultants pour chaque point et chaque direction de mesure sont consignés sur la figure 4.7.

Ces diagrammes montrent un comportement relativement homogène du robot dans son espace de travail avec un gain inférieur à 5 dB en dessous de 6 Hz. Les résonances sont situées à 9 Hz selon l'axe X et à 15 Hz selon l'axe Y , toutes deux supérieures aux fréquences des mouvements humains (voir tableau 2.3).

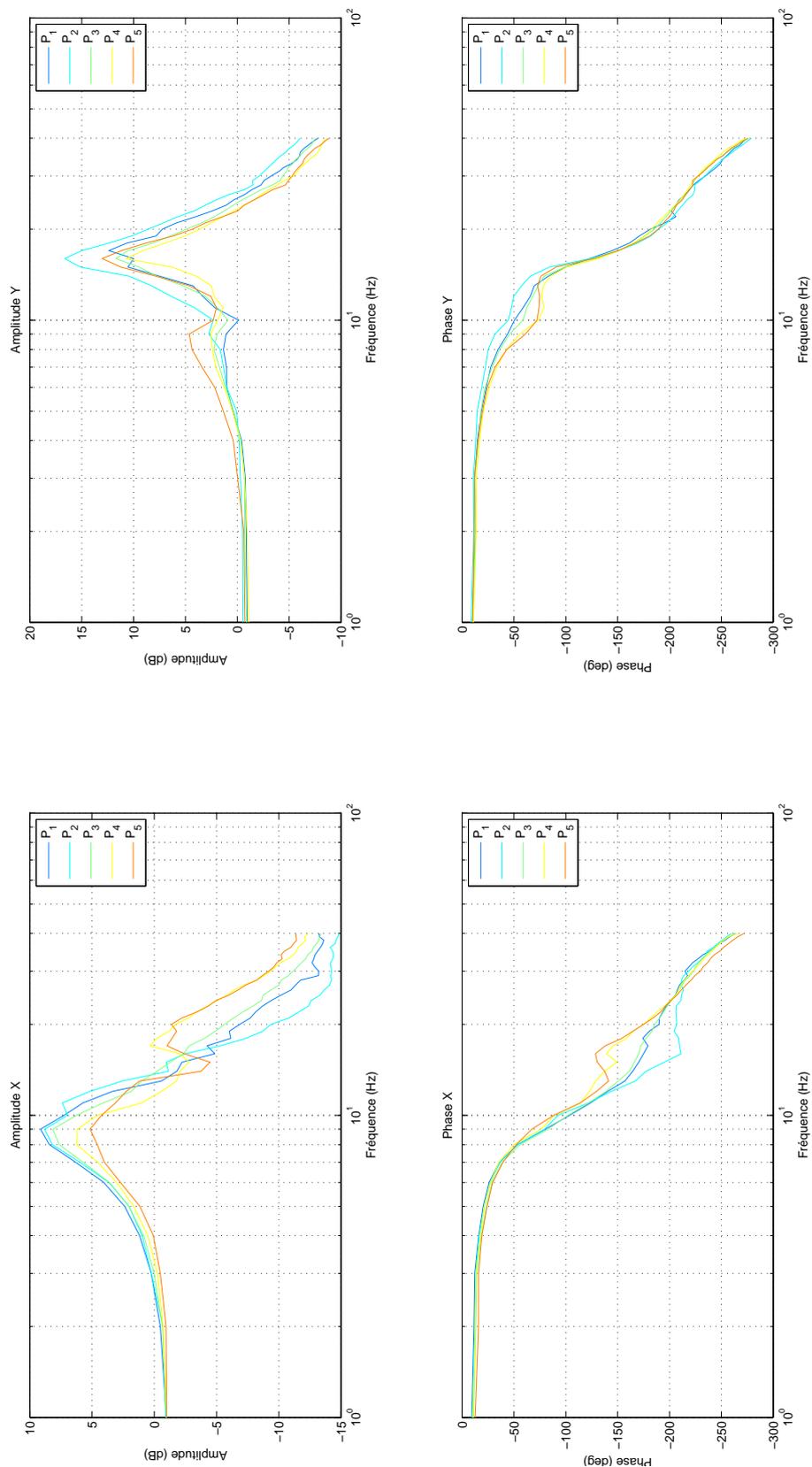


FIGURE 4.7: Diagrammes de Bode du robot en suivi de position pour de petits déplacements autour des cinq points de fonctionnement de la figure 4.6.

Retour sur le dimensionnement de l'anneau

L'effecteur du robot a été dimensionné au paragraphe 3.2 à l'aide d'une modélisation unidimensionnelle dont les paramètres correspondent aux caractéristiques d'une interface haptique Geomagic PHANTOM. Nous vérifions ici ce dimensionnement en identifiant ces paramètres à partir de mesures sur le robot. Dans la pratique, ces mesures sont effectuées suivant un axe vertical (selon l'axe y).

Pour identifier la masse m et le coefficient de frottement visqueux f du robot, nous réalisons le banc d'essai de la figure 4.8. L'extrémité d'un index est placée dans l'anneau, tandis que le reste du doigt est fixé à une glissière guidant le mouvement verticalement (la résonance est plus importante selon cette direction). On demande ensuite à un utilisateur de déplacer son doigt avec des vitesses et amplitudes variées, sans entrer en collision avec le robot. La vitesse, l'accélération de l'effecteur et les couples moteur sont enregistrés simultanément. L'identification des paramètres au sens des moindres carrés permet d'aboutir aux valeurs suivantes :

$$m = 220 \text{ g} \quad f = 0,89 \text{ Ns/m} \quad (4.5)$$

En reprenant le dimensionnement de l'anneau avec ces nouveaux paramètres, nous aboutissons à un diamètre plus important. Il faudrait en effet 34 mm et non 24 mm pour ne pas heurter un doigt dont les vitesse et accélération maximales sont de 1,26 m/s et 24,5 m/s² respectivement.

Finalement, la figure 4.9 présente l'abaque de l'erreur de suivi en fonction des vitesses et accélérations d'un doigt dans un cas unidimensionnel. Il montre qu'en flexion/extension, où la différence entre les diamètres du doigt le plus gros et de la surface interne de l'anneau est d'environ 3 mm, l'anneau est capable de suivre les mouvements du doigt sans entrer en contact avec lui jusqu'à des vitesses de 0,6 m/s et des accélérations de 8 m/s².

4.3.2 Restitution d'effort au contact

Lorsque l'avatar du doigt de l'utilisateur rencontre un objet virtuel, l'interface doit appliquer sur son doigt les forces d'interaction qui en résultent.

Nous modélisons l'environnement virtuel comme un mur viscoélastique compliant sans frottements tangentiels. On note que de nombreux travaux sont dédiés au calcul de métriques dans un environnement virtuel (ERICSON 2004 ; LARSEN et al. 2000). Soit $\mathbf{X}_{e/0}$ les coordonnées du point de la surface du mur le plus proche de la périphérie de l'avatar du doigt. On appelle $d_{f/e}$ et $\dot{d}_{f/e}$ respectivement la pénétration et la vitesse de la périphérie de l'avatar du doigt en ce point (de sorte que $d_{f/e} < 0$ au contact). Nous exprimons les efforts \mathbf{F}_e résultant des interactions de l'avatar de l'utilisateur avec le mur, orientés selon la normale \mathbf{n} au mur en ce point, sous la



FIGURE 4.8: Banc d'essai pour l'identification des paramètres du modèle unidimensionnel de l'interface (vue de dessus).

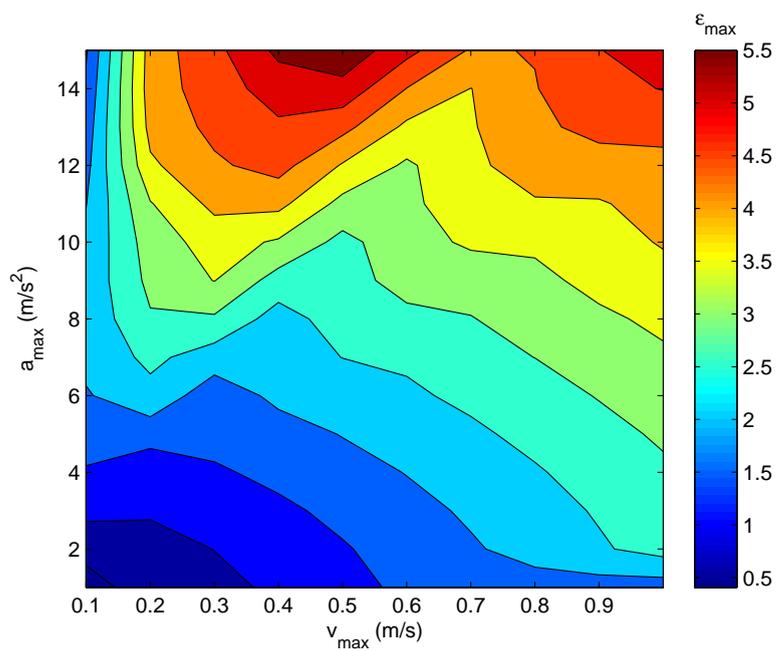


FIGURE 4.9: Abaque de l'erreur de suivi en fonction de la vitesse et de l'accélération maximales d'un doigt (modèle 1D).

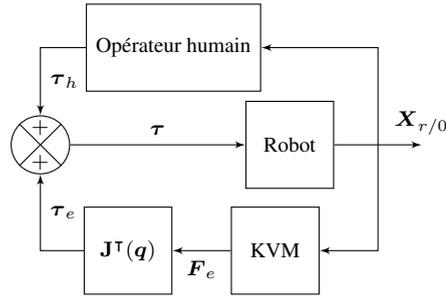


FIGURE 4.10: Schéma de commande de l'interface haptique au contact. KVM : mur virtuel, voir équation (4.6).

forme d'une contrainte de Kelvin-Voigt modifiée régissant l'expression de l'impédance \mathbf{Z}_e du mur (ACHHAMMER et al. 2010) (figures 4.10 et 4.11) :

$$\begin{cases} \text{si } d_{f/e} < 0 \text{ et } \dot{d}_{f/e} < 0 & \mathbf{F}_e = -d_{f/e}(\mathbf{K}_e + \mathbf{B}_e s)\mathbf{n} & (\text{dans ce cas } \mathbf{Z}_e = \mathbf{K}_e + \mathbf{B}_e s) \\ \text{si } d_{f/e} < 0 \text{ et } \dot{d}_{f/e} > 0 & \mathbf{F}_e = -d_{f/e}\mathbf{K}_e\mathbf{n} & (\text{dans ce cas } \mathbf{Z}_e = \mathbf{K}_e) \\ \text{sinon,} & \mathbf{F}_e = 0 & \end{cases} \quad (4.6)$$

avec \mathbf{K}_e et \mathbf{B}_e respectivement la raideur et l'amortissement du mur. Cette force se traduit par un couple articulaire :

$$\boldsymbol{\tau}_e = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{F}_e \quad (4.7)$$

Le couple $\boldsymbol{\tau}$ articulaire appliqué à l'interface est ainsi donné par :

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_h + \boldsymbol{\tau}_e \quad (4.8)$$

où $\boldsymbol{\tau}_h$ est le couple dû à la force \mathbf{F}_h appliquée par le doigt sur l'effecteur. Il en résulte la loi de commande de la figure 4.10.

Dans ce mode de commande, le doigt et l'interface sont en contact en un point de l'effecteur. Cette liaison mécanique permet de restituer à l'utilisateur les efforts résultant de la pénétration de l'avatar du doigt dans le mur, comme le fait toute interface classique. Cette loi fonctionne donc comme un couplage ressort-amortisseur entre le mur et l'avatar du doigt (figure 4.11).

Implémentation expérimentale

Le mur virtuel est implémenté directement dans le contrôleur. Sa raideur et son amortissement sont établis à des valeurs communes permettant à l'utilisateur de ressentir une haute impédance :

$$\mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} 2500 & 0 \\ 0 & 2500 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} 35 & 0 \\ 0 & 35 \end{bmatrix}$$

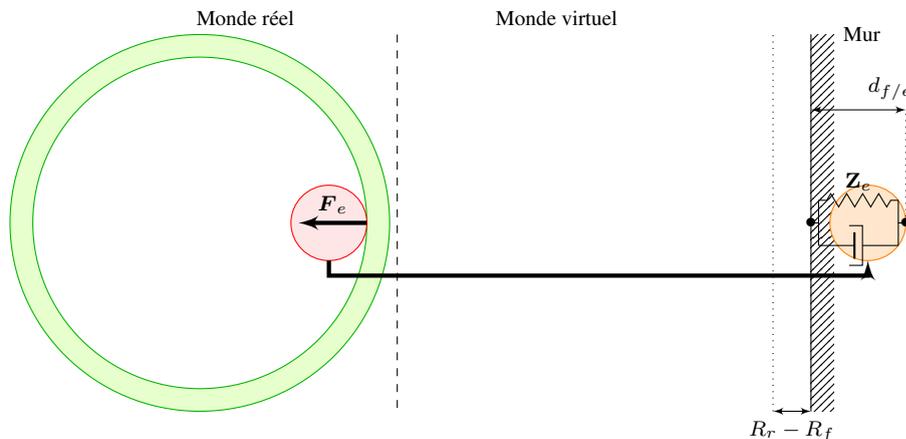


FIGURE 4.11: Équivalent mécanique à la loi de commande au contact – illustration dans un cas unidimensionnel. Vert : anneau. Rouge : doigt. Orange : avatar du doigt.

avec \mathbf{K}_e en N/m et \mathbf{B}_e en Ns/m. On note que ces gains sont quatre fois supérieurs aux gains en espace libre. En effet, au contact, l'utilisateur contribue à la stabilisation du robot (DÍAZ et GIL 2010).

4.4 Gestion de la transition entre espace libre et contact

L'utilisation d'une interface à contacts intermittents requiert la gestion de la transition entre le suivi en espace libre et le rendu d'effort au contact. Il s'agit de proposer une méthode qui permette au doigt de l'utilisateur de venir au contact de la surface intérieure de l'anneau et de changer l'impédance de l'interface. Nous commençons par un exposé critique de la stratégie utilisée dans la littérature. Nous détaillons ensuite une méthode qui permet d'en pallier les défauts.

4.4.1 État de l'art : transition par bascule simple

Dans la littérature (FANG, XIE et LIU 2009 ; NAKAGAWARA et al. 2005 ; YOSHIKAWA et NAGURA 1997), la loi de commande en espace libre est un suivi de position comme décrit dans le paragraphe 4.3.1. Au contact par contre, la commande exploite les données d'un capteur d'effort. Une bascule simple permet de changer de type de commande au moment du contact.

Dans le cas de tâches de téléopération (FANG, XIE et LIU 2009 ; NAKAGAWARA et al. 2005), lorsqu'un contact est détecté dans l'environnement distant, le basculement de la commande en position se traduit par un mouvement rapide de l'interface maître vers le doigt de l'utilisateur, jusqu'à ce qu'elle entre en collision avec lui et lui restitue les efforts correspondant aux interactions de l'esclave avec l'environnement distant. Le choc qui en résulte peut dégrader la qualité de l'interaction. La solution envisagée à ce problème par (FANG, XIE et LIU 2009) consiste à

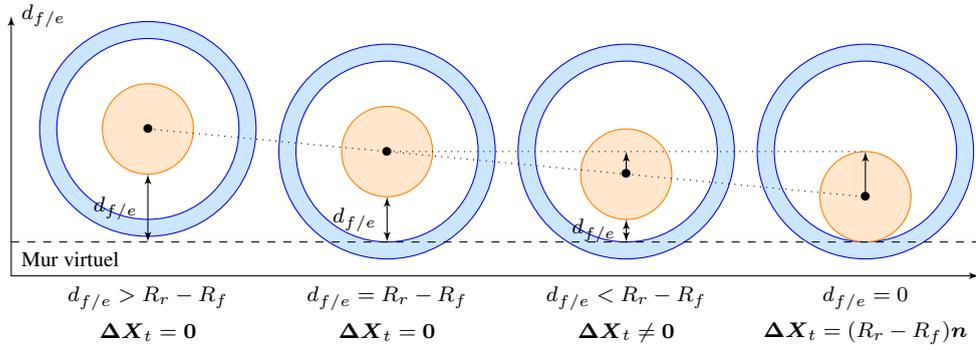


FIGURE 4.12: Positions des avatars du doigt et de l'anneau en fonction de la pénétration dans le mur virtuel au cours d'un changement de référence. Cercles bleus : avatar de l'anneau ; Disques orange : doigt ; flèches simples : ΔX_t .

augmenter la fréquence d'échantillonnage du contrôleur pour réduire le temps de détection du contact. Elle nécessite cependant une électronique optimisée et coûteuse.

Dans le cas d'interactions avec un environnement virtuel, la pénétration $d_{f/e}$ de l'avatar du doigt de l'utilisateur dans le mur virtuel est plus facilement accessible. (YOSHIKAWA et NAGURA 1997) l'utilisent pour effectuer un changement de référence ΔX_t sur la consigne de suivi à proximité du mur (figure 4.12) :

– loin du mur virtuel, la consigne de suivi considérée par le contrôleur est le centre du doigt $X_{f/0}$:

$$\forall d_{f/e} > R_r - R_f : \Delta X_t = 0 \quad (4.9)$$

– à proximité du mur virtuel, la référence de la consigne est décalée progressivement :

$$\forall d_{f/e} \in [0; R_r - R_f] : \Delta X_t(d_{f/e}) = (R_r - R_f - d_{f/e})\mathbf{n} \quad (4.10)$$

Ce changement de référence vient s'insérer au niveau de la consigne de suivi en espace libre, de telle sorte que l'erreur de suivi ϵ_X prend la forme :

$$\epsilon_X = X_{f/r} - \Delta X_t \quad (4.11)$$

Au moment où l'avatar du doigt parvient au contact du mur virtuel ($d_{f/e} = 0$), un effort F_e est restitué à l'utilisateur par le biais de l'équation (4.6). La consigne de suivi de position est désactivée, par le biais d'un interrupteur S piloté par F_e et défini par exemple comme :

$$S = \begin{bmatrix} e^{-\alpha \|F_e\|} & 0 \\ 0 & e^{-\alpha \|F_e\|} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

avec α un coefficient sans dimension tel que $\forall F_e, \alpha \gg \|F_e\|$. Ainsi, quand l'avatar du doigt rencontre un objet virtuel, $\|F_e\| \neq 0$. L'interrupteur est actionné : le robot n'est plus influencé par la consigne de suivi ($e^{-\alpha \|F_e\|} \simeq 0$) mais seulement par les efforts de contact. Quand l'avatar

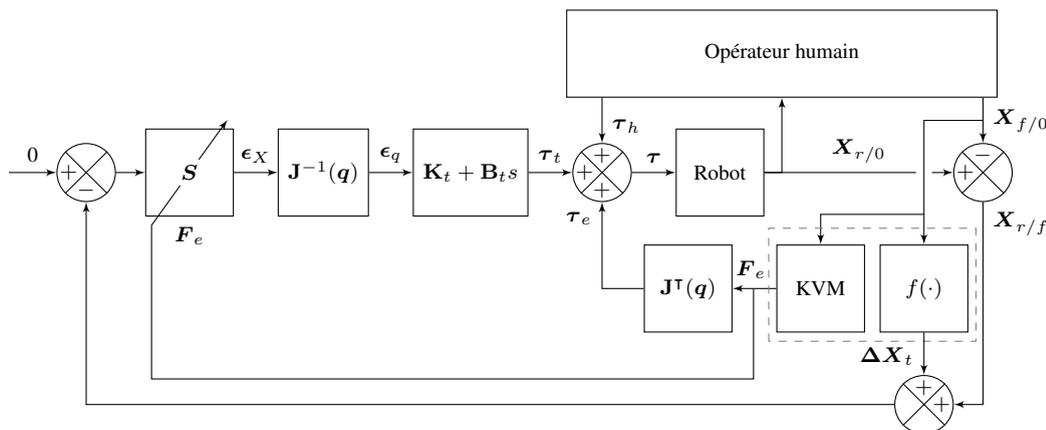


FIGURE 4.13: Loi de commande avec bascule simple pour la restitution d'interactions avec un environnement virtuel, dans l'esprit de (YOSHIKAWA et NAGURA 1997). S : bascule, voir équation (4.12). Zone pointillée : Environnement virtuel. $f(\cdot)$: calcul du décalage de référence de position, voir figure 4.12. KVM : mur virtuel, voir équation (4.6).

du doigt quitte l'objet virtuel, $\|F_e\| = 0$, l'effort restitué est annulé et les couples de référence de suivi sont transmis aux variateurs.

La transition est moins brusque que dans le cas des implémentations de (NAKAGAWARA et al. 2005) et (FANG, XIE et LIU 2009) car grâce au changement de référence des équations (4.9) et (4.10), le doigt est déjà au contact ou l'est quasiment au moment de la bascule.

La figure 4.13 décrit une implémentation possible de la loi de commande avec bascule simple dans le cas de l'infrastructure expérimentale présentée au paragraphe 4.2. Comme le robot 2D n'a pas de capteur d'effort, la force à restituer à l'utilisateur est calculée comme proposé à l'équation (4.6). Le suivi en espace libre et la restitution d'efforts au contact agissent en parallèle sur les courants moteurs et sont activés l'un après l'autre en fonction des interactions avec l'environnement virtuel. On peut distinguer trois phases de fonctionnement (figure 4.14) :

- en espace libre, on retrouve un couplage virtuel simple entre le centre du doigt et l'anneau ;
- pendant la transition, la référence du couplage virtuel est progressivement écartée du centre du doigt ;
- au contact, on retrouve le schéma mécanique équivalent à une restitution d'effort simple.

Implémentation expérimentale

Des essais d'interactions avec un mur virtuel sont effectués en utilisant cette loi de commande. La figure 4.15 présente les positions des centres de l'anneau et du doigt dans la direction normale au mur virtuel. L'effort selon la même direction est aussi représenté. F_t (calculé d'après τ_t) et F_e désignent respectivement les efforts correspondant au suivi en espace libre et au rendu du mur virtuel. De 0 à 35 mm, l'avatar du doigt est loin du mur virtuel. L'anneau a pour consigne de faire correspondre son centre avec celui du doigt. Pendant cette phase, F_t oscille jusqu'à

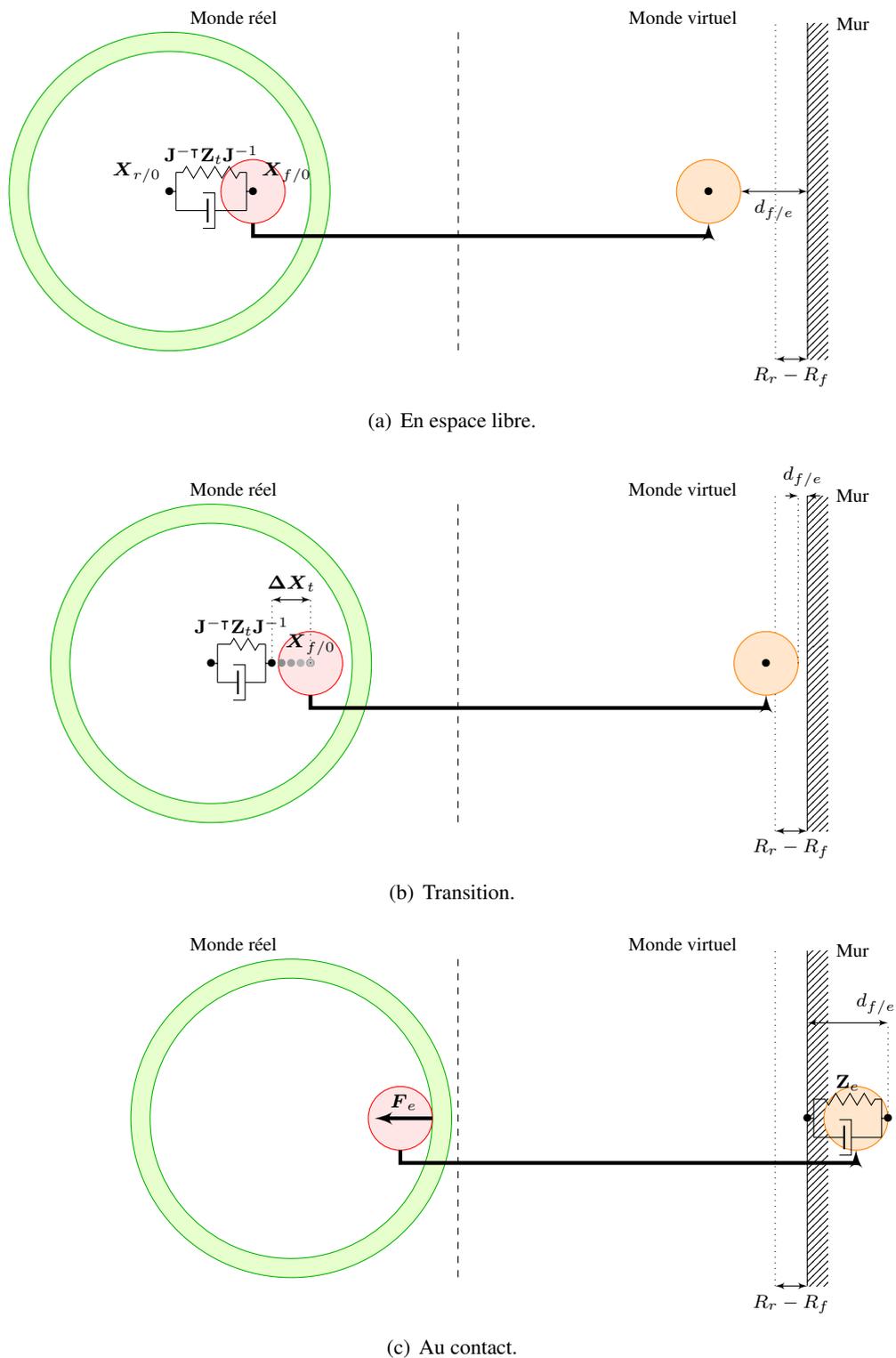


FIGURE 4.14: Équivalents mécaniques de la loi de commande avec bascule simple – illustrations dans un cas unidimensionnel. Vert : anneau. Rouge : doigt. Orange : avatar du doigt.

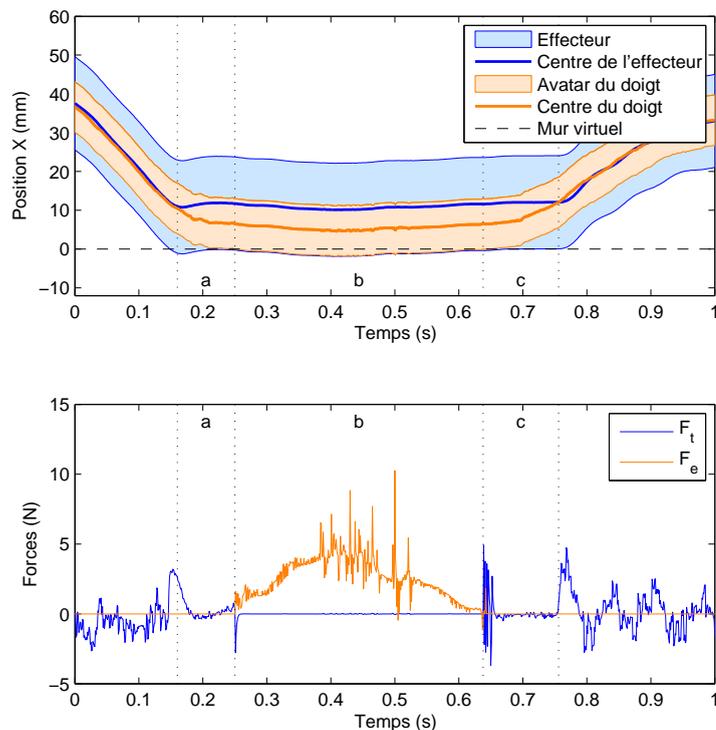


FIGURE 4.15: Déplacement unidimensionnel dans le cas d'une loi de commande avec bascule simple. F_t : effort de suivi. F_e : effort issu de l'environnement. Vitesse avant impact : $-0,1$ m/s.

1,5 N. Ces oscillations ne sont pas ressenties par l'utilisateur puisque l'anneau n'entre pas au contact avec lui. Lorsque l'avatar du doigt s'approche du mur virtuel, la référence du suivi ΔX_t est décalée en direction de l'espace libre : les courbes des centres de l'anneau et du doigt se séparent, et la périphérie de l'avatar du doigt se rapproche de celle de l'anneau dans la direction du mur jusqu'à coïncider avec celle-ci (zone 4.15a). Au moment où l'avatar du doigt entre au contact du mur virtuel (c'est-à-dire à 0,25 s : fin de la zone 4.15a), $\|F_t\| \simeq 0$ et $\|F_e\| \gtrsim 0$ (zone 4.15b). Lorsque l'opérateur appuie en direction du mur, $\|F_e\|$ croît et l'interface restitue cet effort comme une interface haptique classique. Dans cette phase, les efforts F_e sont bruités car ils sont calculés à partir de la position et de la vitesse du doigt. Finalement, lorsqu'il quitte l'environnement virtuel, $\|F_e\|$ décroît jusqu'à 0. La référence ΔX se décale vers le centre du doigt (zone 4.15c) puis le suivi de position reprend.

Expérimentalement, on constate que cette loi de commande permet de restituer efficacement les interactions de l'utilisateur avec un environnement virtuel. Cependant, deux pics d'efforts d'amplitude 4 N apparaissent sur la figure 4.15 au niveau des transitions, que l'utilisateur ressent comme un à-coup : la première à la fin de la zone 4.15a, la seconde au début de la zone 4.15c. Ces instants correspondent à l'activation et à la désactivation de la bascule S , qui se traduit par un changement dans le pilotage des efforts. En effet, lors du suivi en espace libre et de la transition (figure 4.14, a et b), les mouvements de l'anneau sont régis par l'erreur de positionnement entre les centres du doigt et de l'effecteur. Au contact en revanche, ses mouvements

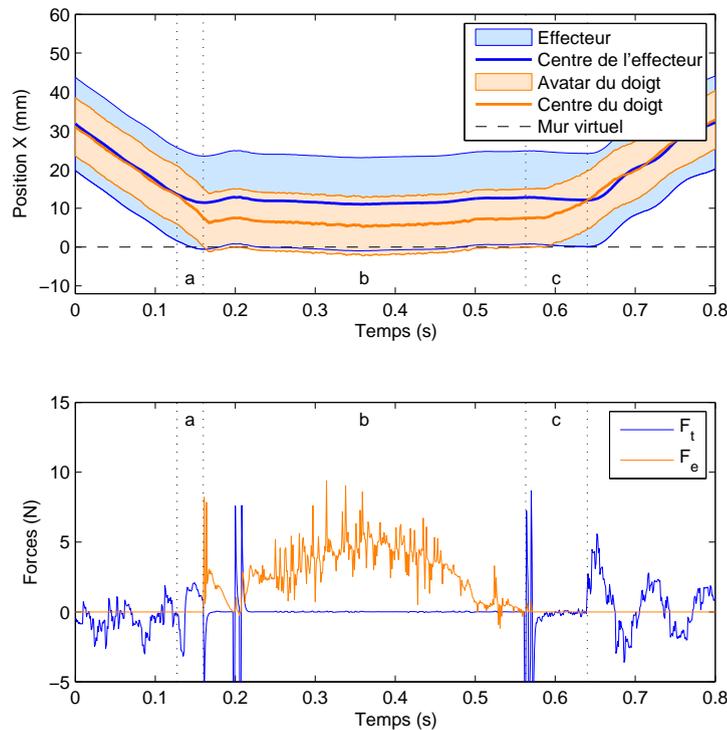


FIGURE 4.16: Déplacement unidimensionnel avec transition ayant lieu trop tôt ($R_f^* = 7,5$ mm, surestimé). F_t : effort de suivi. F_e : effort issu de l'environnement. Vitesse avant impact : $-0,13$ m/s.

sont dépendants de la pénétration de l'avatar du doigt dans l'environnement virtuel, qui dépend de sa géométrie. Or si elle est mal estimée, cela peut mener à des comportements du robot qui risquent de dégrader la qualité de l'interaction comme dans le cas du comportement des robots de (FANG, XIE et LIU 2009 ; NAKAGAWARA et al. 2005).

Nous examinons ci-dessous les effets d'une telle erreur d'estimation du rayon du doigt, afin de juger de son impact sur la façon dont l'utilisateur ressent le contact avec l'environnement virtuel.

Effets d'une erreur sur le rayon du doigt

Sur la figure 4.15, la loi de commande avec bascule simple semble permettre de restituer efficacement les interactions d'un utilisateur avec un mur virtuel. Cependant, le réalisme du contact dépend des erreurs d'estimation sur la géométrie du doigt. Pour le démontrer, on conduit deux expérimentations supplémentaires avec le doigt d'un utilisateur dont le rayon est d'environ $6,5$ mm :

- *Surestimation du rayon du doigt* : Pour observer l'effet d'un avatar plus grand que le doigt sur le rendu du contact, on fixe volontairement son rayon à $R_f^* = 7,5$ mm. On réitère l'expérimentation précédente dans ces conditions (figure 4.16).

Comme l'avatar du doigt est plus grand que le doigt réel, la référence du suivi de position n'est pas suffisamment décalée durant la transition. L'avatar du doigt entre donc au contact du mur virtuel au début de la zone 4.16a, tandis que l'anneau n'est pas encore au contact du doigt. Une force F_e est tout de même restituée par l'interface. L'anneau vient donc entrer en collision avec le doigt de l'utilisateur, à 0,16 s. Cela donne naissance à un pic d'efforts plus important (environ 8 N) observé dans la zone 4.16a.

Pendant la transition, l'utilisateur ressent la collision de l'anneau avec son doigt comme un impact. L'interface ne restitue donc pas fidèlement les interactions avec l'environnement virtuel pendant cette phase, puisqu'elle en altère le comportement. En revanche, une fois au contact, l'impédance ressentie par l'utilisateur correspond bien à l'impédance Z_e de l'environnement puisque les efforts de suivi ont été annulés (zone 4.16b). On remarque que dans cette phase du mouvement, la surestimation du rayon du doigt par l'interface apparaît sur la courbe de position : les périphéries de l'effecteur et de l'avatar du doigt ne coïncident pas. Un millimètre les sépare. Par ailleurs, les efforts F_e sont bruités car ils sont estimés à partir de la position et de la vitesse du doigt.

Lors de la transition du contact vers l'espace libre (zone 4.16c), l'anneau s'écarte du doigt dès que la périphérie de son avatar quitte le mur virtuel (à 0,56 s). À ce moment, comme l'interface n'exerçait qu'un effort très faible sur le doigt de l'utilisateur, celui-ci ne ressent pas que le contact a été brusquement rompu. La transition est donc réaliste. Enfin, au fur et à mesure que le doigt s'éloigne du mur, la référence du suivi se translate progressivement au centre du doigt et le suivi de position reprend normalement.

- *Sous-estimation du rayon du doigt* : On fixe volontairement le rayon de l'avatar du doigt à $R_f = 5,5$ mm et on réitère l'expérimentation précédente (figure 4.17).

Comme l'avatar du doigt est plus petit que le doigt réel, la référence est décalée plus que nécessaire pendant la transition. L'anneau entre donc en collision avec le doigt réel tandis que son avatar n'est pas encore au contact du mur, ici à 0,32 s. Aucun effort F_e n'est encore restitué : l'opérateur ressent une impédance Z_t correspondant à l'effort de suivi, dont la référence n'a pas été décalée correctement (zone 4.17a). Lorsque la périphérie de l'avatar du doigt traverse finalement le mur virtuel, à 0,5 s, le système bascule au contact avec un pic d'effort. Une impédance Z_e réaliste est finalement restituée à l'utilisateur par l'interface (zone 4.17b). La même transition est observée et ressentie dans une moindre mesure par l'utilisateur lorsque son doigt quitte le mur virtuel (zone 4.17c).

Ainsi, lorsque le rayon de l'avatar du doigt est sous-estimé, l'interface restitue à l'utilisateur ses interactions avec l'environnement virtuel de manière biaisée. En effet, le mur virtuel a une impédance Z_e unique. Or l'utilisateur expérimente deux couches différentes : la première, parasite, a l'impédance de la boucle du suivi en espace libre. La seconde correspond au mur virtuel.

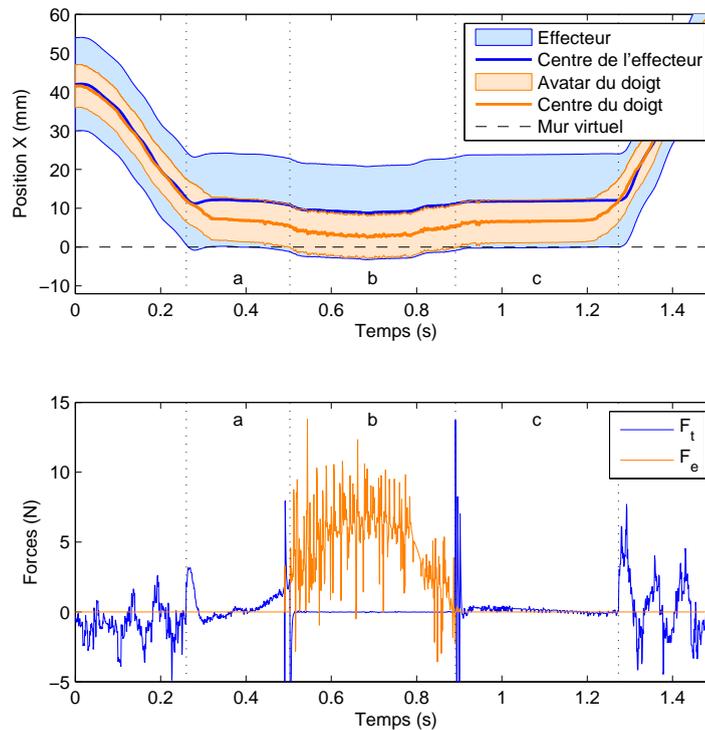


FIGURE 4.17: Déplacement unidimensionnel avec transition ayant lieu trop tard ($R_f = 5,5$ mm, sous-estimé). F_t : effort de suivi. F_e : effort issu de l'environnement. Vitesse avant impact : $-0,1$ m/s.

Conclusion

Ces expérimentations confirment qu'avec la loi de la littérature, une erreur d'estimation du rayon du doigt associée à un changement de référence peut conduire à des comportements parasites pendant la transition entre espace libre et contact. Ceux-ci dégradent le réalisme de l'interaction à travers l'interface haptique :

- si l'avatar du doigt est plus petit que le doigt réel, alors le changement de référence conduit à ce que le doigt touche l'anneau tandis que l'avatar du doigt n'est pas encore au contact de l'environnement. Le contact n'a donc pas lieu au bon moment et l'impédance ressentie par l'utilisateur ne correspond pas à celle de l'environnement.
- si l'avatar du doigt est plus gros que ce dernier, alors le changement de référence conduit à ce que l'anneau ne soit pas au contact du doigt lorsque l'avatar du doigt entre au contact de l'environnement. L'utilisateur ressent une impulsion non réaliste. Finalement, l'impédance qu'il ressent au contact correspond à celle de l'environnement.

Une bonne estimation de la géométrie du doigt permet de minimiser ces effets parasites (comme sur la figure 4.15). Cependant, la main est très sensible aux efforts et dans la pratique, il serait nécessaire d'augmenter les performances de l'effecteur pour garantir que tous ces comportements tombent sous le seuil de détection humaine. On se penche ci-dessous sur d'autres solutions pour minimiser l'influence de telles erreurs d'estimation sur le rendu du contact.

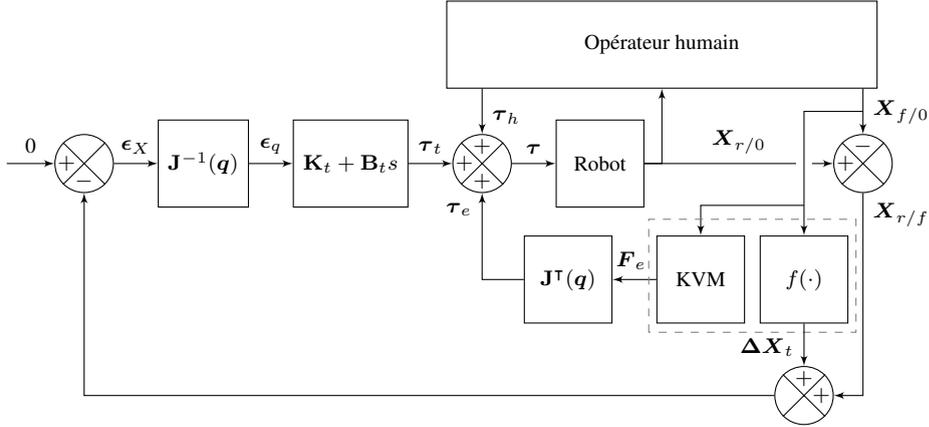


FIGURE 4.18: Loi de commande sans bascule pour la restitution d'interactions avec un environnement virtuel, dans l'esprit de (YOSHIKAWA et NAGURA 1997). Zone pointillée : Environnement virtuel. $f(\cdot)$: calcul du décalage de référence de position, voir figure 4.12. KVM : mur virtuel, voir équation (4.6).

4.4.2 Loi de commande sans bascule

Les expérimentations menées sur la loi de commande de la littérature dans le paragraphe précédent montrent que l'utilisation d'une bascule entre deux chaînes de commande différentes est à l'origine de pics d'effort parasites, même lorsque la géométrie du doigt est bien estimée. Or au moment du contact, si le rayon de l'avatar du doigt correspond à celui du doigt, la référence du suivi est décalée de sorte que les périphéries du doigt et de l'anneau coïncident. L'effort de suivi est donc annulé. Dans le cas de notre implémentation sans capteur d'effort, la bascule est alors superflue.

Dans ces conditions nous pouvons reprendre l'expression du décalage de référence des équations (4.9) et (4.10), et lui adjoindre la contrainte suivante :

$$\forall d_{f/e} < 0 : \Delta \mathbf{X}_t(d_{f/e}) = (R_r - R_f)\mathbf{n} = \text{constante} \quad (4.13)$$

Nous modifions ensuite la loi de commande la littérature en supprimant la bascule (figure 4.18). Les schémas mécaniques unidimensionnels équivalents restent inchangés par rapport à la figure 4.14.

Implémentation expérimentale

Des essais d'interactions avec un mur virtuel sont effectués. La figure 4.19 présente l'évolution conjointe des positions des centres de l'anneau et du doigt et les efforts associés.

Cette loi de commande a un comportement identique à la précédente. Cependant, comme tous les efforts sont appliqués continûment au robot, les pics d'effort de suivi au moment des transitions

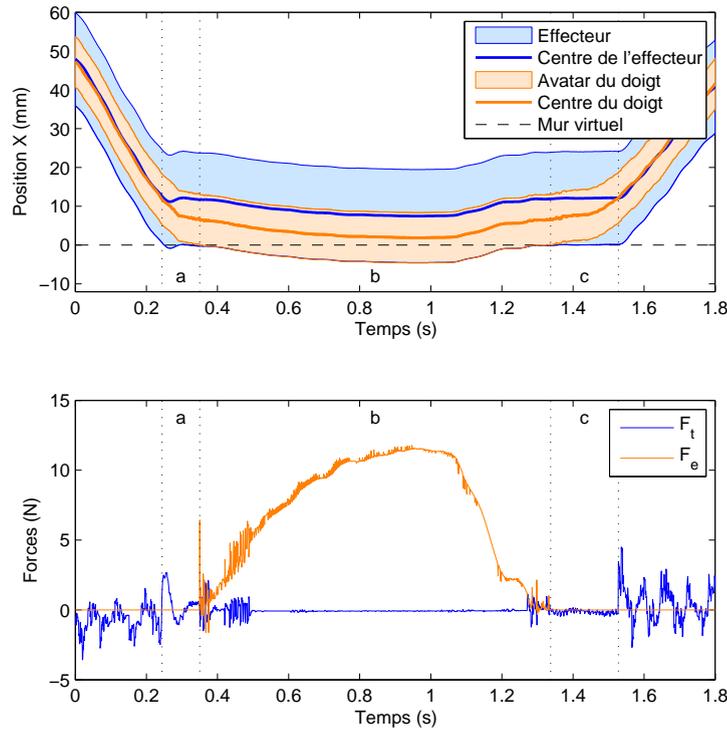


FIGURE 4.19: Déplacement unidimensionnel dans le cas d'une loi de commande sans bascule.
 F_t : effort de suivi. F_e : effort issu de l'environnement. Vitesse avant impact : $-0,1$ m/s.

ont disparu. En revanche, on remarque à environ $0,45$ s que le bruit de mesure sur la position et la vitesse du doigt est doublement restitué à l'utilisateur : en effet, il est amplifié d'une part à travers les efforts de l'environnement, d'autre part à travers l'effort de suivi.

Nous réitérons les expérimentations précédentes avec un doigt de rayon $R_f = 6,5$ mm en introduisant une erreur sur le rayon de l'avatar du doigt :

- *Surestimation du rayon du doigt* : nous fixons volontairement le rayon de l'avatar du doigt à $R_f^* = 7,5$ mm. Les résultats expérimentaux correspondent sont représentés sur la figure 4.20. Comme précédemment, l'anneau se déplace pour venir au contact du doigt sans pic d'effort important. L'utilisateur ne ressent pas d'impulsion. L'erreur sur l'estimation du rayon du doigt apparaît sur la courbe des efforts de suivi : ce dernier est non nul et négatif au contact. En pratique, il est masqué par l'effort de l'environnement. Par ailleurs, l'erreur de positionnement entre les centres de l'anneau et du doigt peut être considérée comme constante au contact. Ainsi, l'effort de suivi résiduel est constant pendant toute la durée du contact. L'impédance expérimentée par l'utilisateur au contact correspond donc bien à celle de l'environnement virtuel.
- *Sous-estimation du rayon du doigt* : nous fixons volontairement le rayon de l'avatar du doigt à $R_f^* = 5,5$ mm. Les résultats expérimentaux obtenus sont illustrés par la figure 4.21. Le doigt entre au contact de l'anneau (à environ $0,5$ s) tandis que l'avatar du doigt n'est pas encore au contact de l'environnement : l'impédance qu'il ressent correspond alors à Z_t . Le même

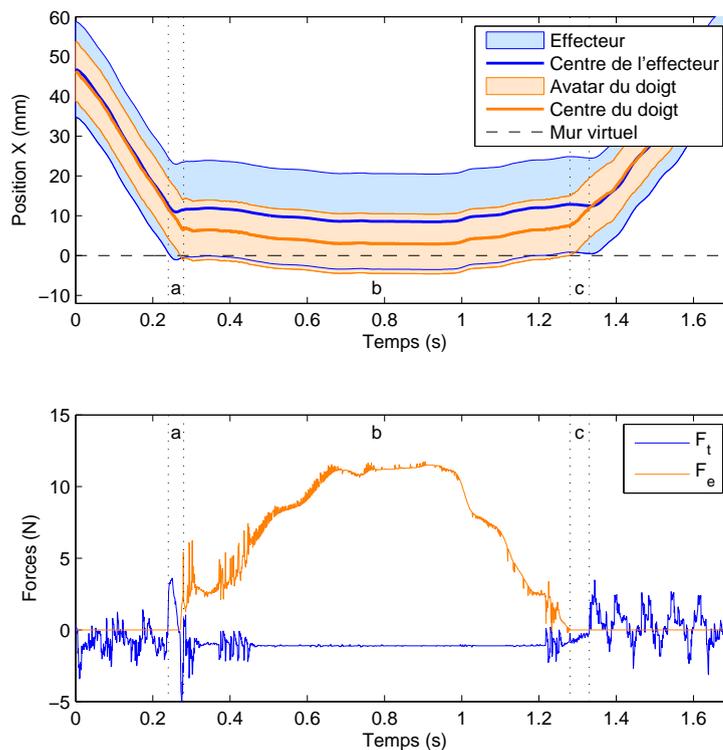


FIGURE 4.20: Déplacement unidimensionnel sans bascule avec transition ayant lieu trop tôt ($R_f^* = 7,5$ mm, surestimé). F_t : effort de suivi. F_e : effort issu de l'environnement. Vitesse avant impact : $-0,13$ m/s.

phénomène est observé lors de la transition du contact à l'espace libre. Pendant le contact en revanche, l'effort résiduel du suivi de position est constant et masqué par l'effort issu de l'environnement virtuel : l'impédance ressentie par l'utilisateur correspond bien à celle de l'environnement virtuel.

Conclusion

Ainsi, la loi de commande sans bascule résout les problèmes des pics d'effort de la littérature. Si la géométrie du doigt est surestimée, l'utilisateur ne ressent pas d'impulsion au moment du contact. Si par contre la géométrie du doigt est sous-estimée, il expérimente deux couches différentes : la première a la raideur de l'asservissement en suivi de position, la seconde a la raideur de l'environnement virtuel.

Cette loi de commande présente cependant l'inconvénient de restituer doublement à l'utilisateur tout bruit de mesure sur la position du centre du doigt par rapport à l'anneau : en effet, comme l'effort de suivi n'est pas inhibé au contact, tout bruit de mesure sur les position et vitesse du doigt est amplifié d'une part au travers du calcul de F_t , d'autre part au travers de celui de F_e .

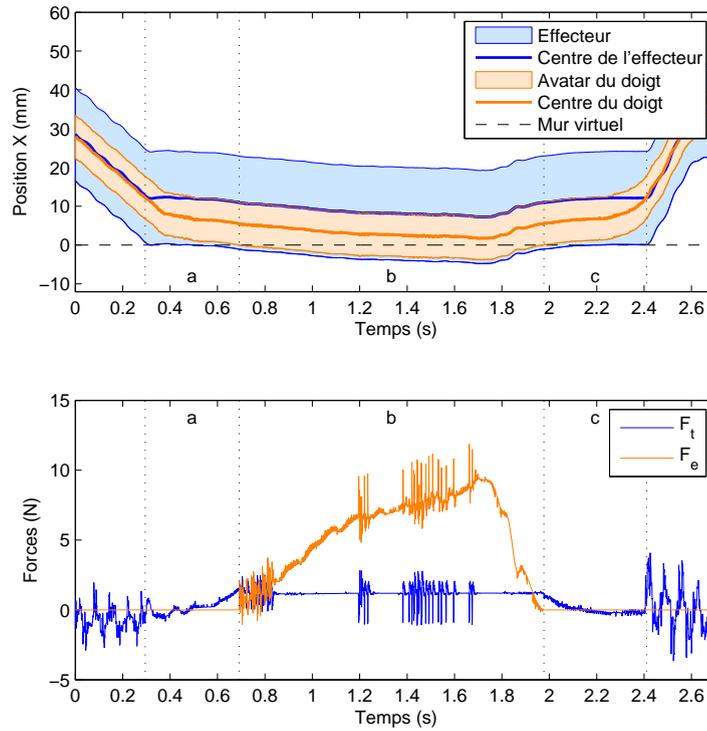


FIGURE 4.21: Déplacement unidimensionnel sans bascule avec transition ayant lieu trop tard ($R_f^* = 5,5$ mm, sous-estimé). F_t : effort de suivi. F_e : effort issu de l'environnement. Vitesse avant impact : $-0,07$ m/s.

4.4.3 Loi de commande avec transition continue

On cherche ici à élaborer une loi de commande de l'interface haptique qui s'affranchisse des inconvénients des deux lois précédentes :

- on souhaite que l'utilisateur n'expérimente aucune impulsion ;
- l'impédance affichée lorsque le doigt de l'utilisateur est au contact de l'interface doit correspondre à celle de l'environnement virtuel ;
- la loi de commande doit être robuste aux erreurs d'estimation de la géométrie du doigt ;
- le bruit de mesure de la position du doigt ne doit pas venir perturber l'interaction.

La loi de commande sans bascule présente un comportement réaliste dans le cas où le doigt est surestimé, car l'utilisateur expérimente la raideur de l'environnement dès qu'il entre au contact de l'anneau. On se place donc dans ce cas de figure en surestimant volontairement le rayon du doigt à une valeur plus élevée que le rayon du plus gros doigt² : $R_f^* = R_{f, \max} = 11$ mm. Nous cherchons alors à supprimer les deux comportements parasites : i) l'anneau vient à la rencontre du doigt avant que son avatar n'entre au contact de l'environnement, et ii) le bruit de mesure est restitué deux fois à l'utilisateur.

2. D'après (GREINER 1991), le périmètre du plus gros index est 63 mm. Nous considérons donc que le rayon du plus gros doigt est de 10 mm.

Lors d'un contact, les périphéries externe du doigt et interne de l'anneau sont confondues localement. Donc, pendant le contact, les efforts \mathbf{F}_e peuvent être calculés soit à partir de la pénétration $d_{f/e}$ de l'avatar du doigt dans l'environnement, soit à partir de $d_{r/e}$: celle de l'avatar de l'anneau. Dans ce dernier cas cependant, la géométrie de l'avatar du doigt n'intervient pas. On s'affranchit ainsi des erreurs sur l'estimation de sa géométrie. Ainsi, on peut modifier l'expression de l'équation (4.6) :

$$\begin{cases} \text{si } d_{r/e} < 0 \text{ et } \dot{d}_{r/e} < 0 & \mathbf{F}_e = d_{r/e}(\mathbf{K}_e + \mathbf{B}_e s)\mathbf{n} \\ \text{si } d_{r/e} < 0 \text{ et } \dot{d}_{r/e} > 0 & \mathbf{F}_e = d_{r/e}\mathbf{K}_e\mathbf{n} \\ \text{sinon,} & \mathbf{F}_e = 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

Cette formulation permet également de faire en sorte que l'effort parasite dû au bruit de mesure de la position du doigt dans l'anneau ne soit pas restitué deux fois.

En outre, au moment du contact, l'effort de suivi n'est pas nul. Son influence doit être diminuée pour que l'utilisateur ait l'impression que le contact a lieu au bon endroit.

Pour tenir compte de toutes ces contraintes, nous choisissons de diminuer progressivement l'influence de l'effort de suivi en fonction de la proximité de l'avatar du doigt à l'environnement en faisant varier le gain du suivi de position :

$$\boldsymbol{\tau}_t = \beta \mathbf{Z}_t \boldsymbol{\epsilon}_q \quad (4.15)$$

avec β un coefficient sans dimension défini comme :

$$\begin{cases} \text{si } d_{f/e} > R_r & \beta = 1 \\ \text{si } d_{f/e} \in [R_r - R_{f,\max}; R_r] & \beta = 1 - (1 - \beta_{\min}) \frac{R_r - d_{f/e}}{R_{f,\max}} \\ \text{si } d_{f/e} < R_r - R_{f,\max} & \beta = \beta_{\min} \text{ avec } \beta_{\min} \in]0; 1] \end{cases} \quad (4.16)$$

Cette loi de commande a pour équivalents mécaniques unidimensionnels les schémas de la figure 4.22 et le schéma-bloc de la figure 4.23. Elle considère un avatar du doigt volontairement surdimensionné par rapport à la réalité. Par conséquent, si la simulation est couplée à une interface graphique, cet avatar ne peut pas être utilisé comme base pour le retour visuel. En revanche, nous pouvons afficher un avatar dont la géométrie correspond cette fois à celle estimée par l'anneau : un défaut d'affichage sera imperceptible.

Influence de la boucle de suivi

On modélise le système par son équivalent unidimensionnel. Au moment du contact, l'effort de suivi n'est pas nul. Notons-le $F_{t,\max}$. Pour garantir que le contact soit perçu par l'utilisateur

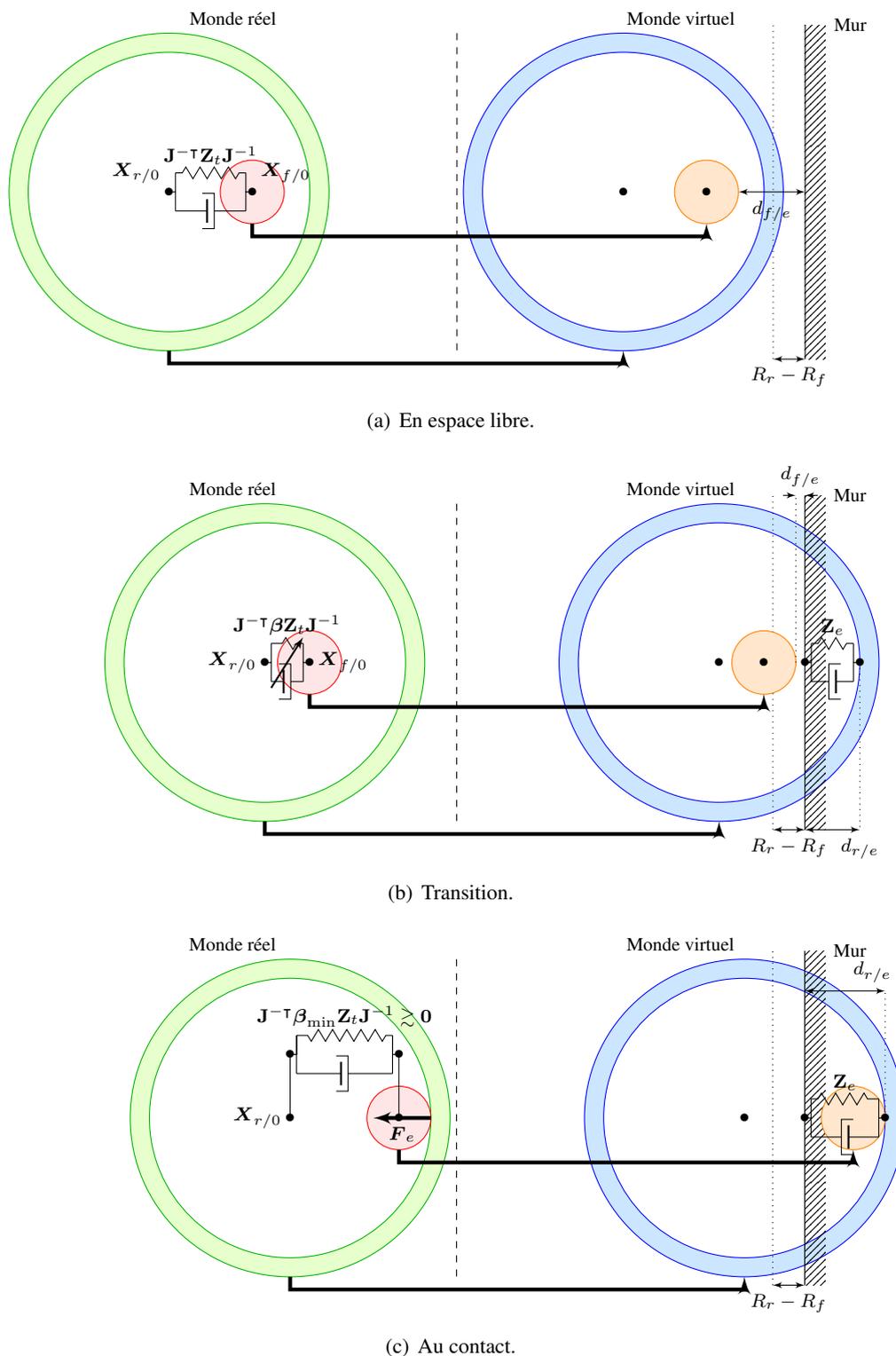


FIGURE 4.22: Équivalents mécaniques de la loi de commande avec transition continue – illustration dans un cas unidimensionnel. Vert : anneau. Rouge : doigt. Bleu : avatar de l’anneau. Orange : avatar du doigt.

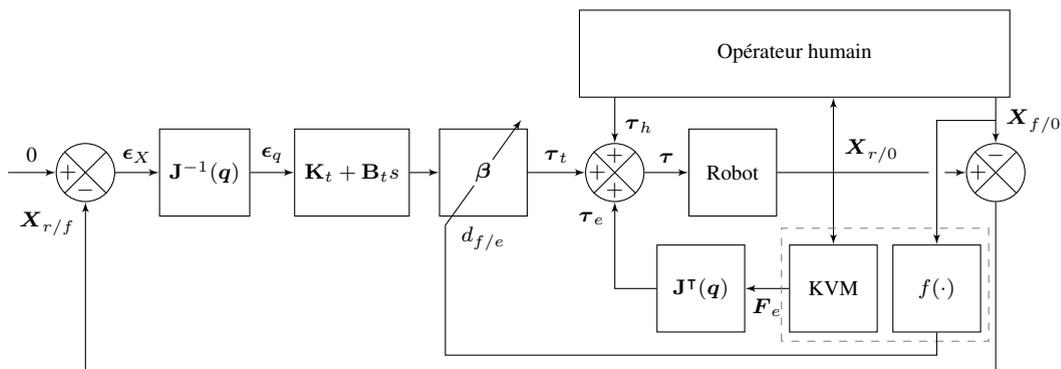
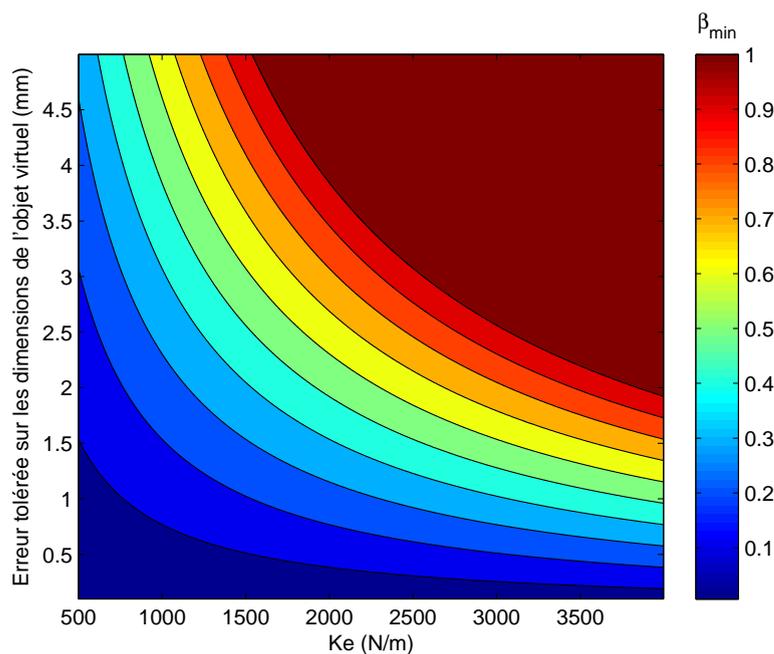


FIGURE 4.23: Loi de commande à transition continue. KVM : mur virtuel, voir équation (4.14).

FIGURE 4.24: Abaque des valeurs de β_{\min} à choisir en fonction de la raideur de l'environnement virtuel et de l'erreur tolérée sur les dimensions de l'environnement virtuel.

comme ayant lieu au bon endroit, il est nécessaire de diminuer son influence à proximité de l'environnement virtuel. Si l'on suppose que l'anneau se stabilise, on obtient l'équilibre :

$$0 = F_e + F_{t, \max} = -K_e d_{r/e} + \beta_{\min} K_t \epsilon_{X, \max} \quad (4.17)$$

D'où :

$$d_{r/e} = \frac{\beta_{\min} K_t \epsilon_{X, \max}}{K_e} \quad (4.18)$$

La valeur de K_t dépend du contrôleur. En considérant $\epsilon_{X, \max} = R_r = 12$ mm comme écart de suivi limite, on s'assure ainsi de prendre en compte le cas le plus défavorable. On peut donc tracer un abaque de la valeur de β_{\min} en fonction de la raideur de l'environnement virtuel et de l'enfoncement maximal toléré (figure 4.24). Par exemple, avec la raideur $K_e = 2500$ N/m

du mur virtuel considéré en simulation ici et en tolérant une erreur de 1% sur les dimensions de l'environnement virtuel (il s'agit de l'intérieur d'un rectangle de dimensions 15 cm×20 cm), on aboutit à une valeur de β_{\min} de 0,49. Au contraire, dans le cas de la restitution de contacts avec un environnement mou et dont les dimensions caractéristiques sont restreintes, le choix de β_{\min} est plus contraint. En effet, l'effort de suivi résiduel doit rester suffisamment élevé pour vaincre les frottements, pour éviter l'apparition d'une « zone morte » qui dégraderait la qualité de l'interaction.

Suramortissement

Au cours de la transition de l'espace libre au contact et dans le cas de mouvements dynamiques, l'anneau est soumis à une force de suivi F_t . Son avatar rencontre le mur virtuel avec une vitesse non nulle v_0 . L'anneau est ensuite sujet à deux forces F_t et F_e : il en résulte une oscillation. Sa durée doit être la plus courte possible, de façon à ce que lorsque le doigt de l'utilisateur arrive au contact de l'anneau un instant plus tard, il ait la sensation de toucher un objet immobile.

Afin de permettre le freinage tout en restituant à l'utilisateur un amortissement qui correspond au mur virtuel, on définit un effort dissipatif agissant en parallèle de l'environnement, actif au moment d'une collision et qui se désactive une fois l'anneau stabilisé par :

$$F_{af} = \begin{cases} B_{af}(\dot{X}_{e/0} - \dot{X}_{r/0}) & \text{si } F_e \neq \mathbf{0} \text{ et } |\dot{X}_{r/0}| > v_{\min} \\ \mathbf{0} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.19)$$

avec B_{af} le surmortissement et v_{\min} choisie de telle manière qu'elle est négligeable par rapport à la vitesse du mouvement (ici nous choisissons $v_{\min} = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s).

On rappelle que l'erreur de suivi varie en fonction de l'accélération et de la vitesse maximales du doigt (figure 4.9). Un doigt de taille maximale est séparé de l'anneau par 3 mm lorsqu'il est en espace libre et ne se déplace pas. Cette distance diminue au fur et à mesure que l'erreur de suivi augmente, mais le temps que met le doigt pour la parcourir dépend de sa vitesse.

La figure 4.25 présente le temps δT mis par un doigt de taille maximale pour parcourir l'espace qui le sépare de l'anneau à sa vitesse maximale, calculée à partir des valeurs de l'abaque 4.9. Elle fixe les limites des temps de stabilisation acceptables en fonction des vitesses considérées.

On se place dans un cas unidimensionnel. Au moment du contact, $\beta = \beta_{\min}$ par l'intermédiaire de l'équation (4.16). L'effort de suivi F_t peut donc être considéré comme négligeable. On suppose que l'anneau arrive au contact du mur virtuel défini par l'équation $y = 0$ à l'instant $t = 0$ avec une vitesse v_0 . Comme le mur est modélisé par un ensemble ressort-amortisseur simple,

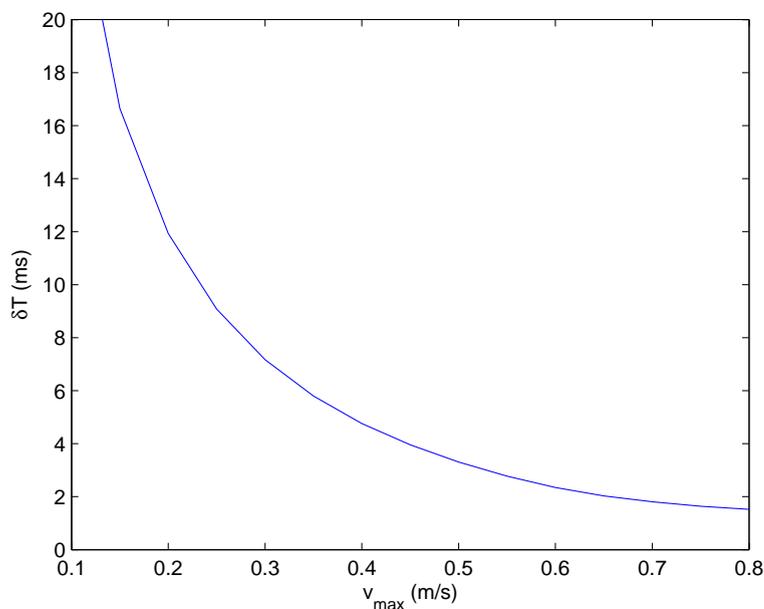


FIGURE 4.25: Temps δT mis par un doigt de taille maximale pour parcourir la distance qui le sépare de l'anneau en fonction de sa vitesse.

l'équation de son mouvement est :

$$m\ddot{y} + (B_e + B_{af})\dot{y} + K_e y = 0 \quad (4.20)$$

On souhaite que l'anneau ne rebondisse pas sur le mur et qu'il se stabilise le plus vite possible. On se place donc en régime sur-amorti. On en déduit le mouvement de l'anneau dans le mur virtuel en fonction du temps t et des paramètres de la simulation :

$$\forall t > 0 : y(t) = \frac{v_0 m}{\sqrt{(B_e + B_{af})^2 - 4mK_e}} \left(e^{\frac{-(B_e + B_{af}) + \sqrt{(B_e + B_{af})^2 - 4mK_e}}{2m} t} - e^{\frac{-(B_e + B_{af}) - \sqrt{(B_e + B_{af})^2 - 4mK_e}}{2m} t} \right) \quad (4.21)$$

Le cas le plus défavorable est le cas mettant en jeu les efforts les plus importants. On considère un mur de raideur $K_e = 2500$ N/m et on cherche à déterminer l'amortissement $B_e + B_{af}$ permettant de le stabiliser dans l'intervalle de temps δt le plus court possible, en fonction de la vitesse v_0 au moment de l'impact. L'abaque de la figure 4.26 présente les temps de stabilisation δt obtenus pour des valeurs de v_0 et $B_e + B_{af}$ données.

Le fait que l'anneau doive se stabiliser avant que le doigt ne le touche se traduit par la contrainte $\delta T > \delta t$. La comparaison des figures 4.25 et 4.26 permet d'aboutir à la courbe de la figure 4.27,

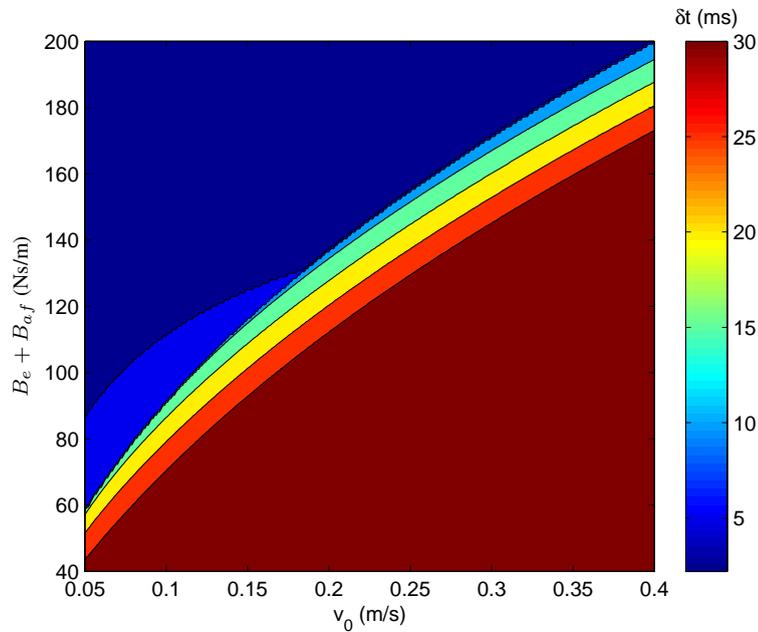


FIGURE 4.26: Abaque du temps δt mis par le robot pour se stabiliser en fonction de la vitesse à l'impact v_0 et du coefficient d'amortissement $B_e + B_{af}$.

qui présente le niveau d'amortissement minimal à utiliser pour que l'anneau soit stabilisé au moment où le doigt le touche à la vitesse de déplacement considérée.

Par exemple, il est nécessaire que l'amortissement $B_e + B_{af}$ du mur soit au moins égal à 140 Ns/m pour que l'anneau soit stabilisé avant que le doigt ne le touche lorsque leur vitesse est de 0,2 m/s.

Nous constatons que les valeurs d'amortissement à considérer sont relativement élevées, et en général supérieures à celle de l'environnement virtuel. On peut ainsi choisir B_{af} pour que le mur remplisse la condition de stabilisation définie par la figure 4.27, dans la limite de stabilité du système.

Implémentation expérimentale

Dans un premier temps, nous étudions le comportement du système avec la loi de commande à transition continue sans suramortissement, à basse vitesse (inférieure à 0,1 m/s). L'environnement virtuel est défini comme précédemment et les gains du contrôleur sont inchangés par rapport à l'implémentation avec loi de commande par bascule précédente. Les résultats de l'expérimentation sont donnés sur la figure 4.28.

De 0 à 0,25 s le comportement du système est inchangé par rapport à l'état de l'art car il s'agit d'un suivi de position pur. À 0,25 s, l'avatar de l'anneau entre au contact de l'environnement

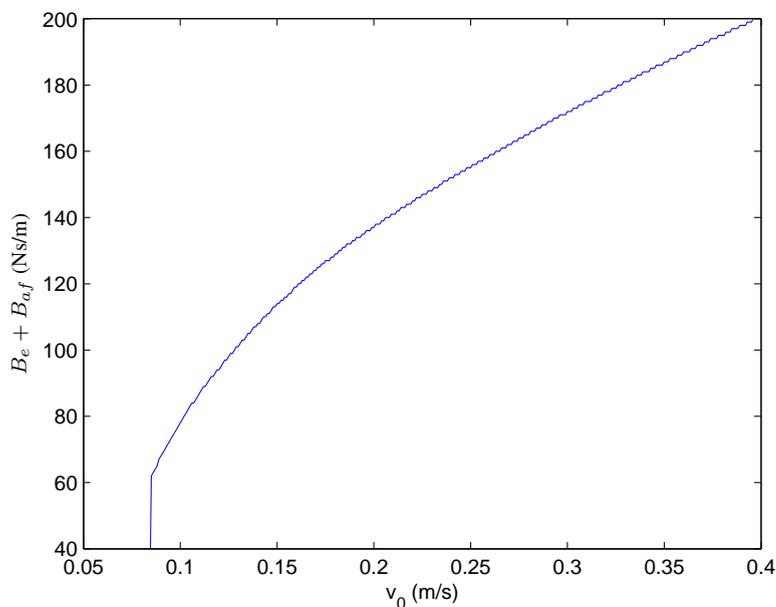


FIGURE 4.27: Amortissement $B_e + B_{af}$ minimal à utiliser pour que l'anneau soit stabilisé lorsque le doigt entre à son contact, pour une vitesse de déplacement donnée.

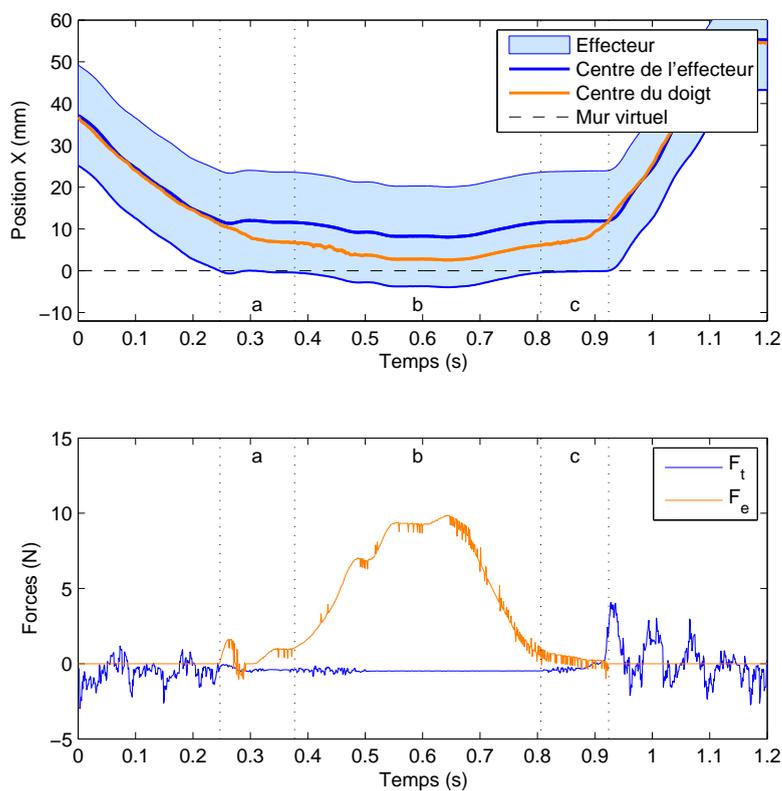


FIGURE 4.28: Déplacement unidimensionnel avec loi de commande à transition continue. F_t : effort de suivi. F_e : effort issu de l'environnement. Amplitude de la vitesse avant impact : 0,07 m/s.

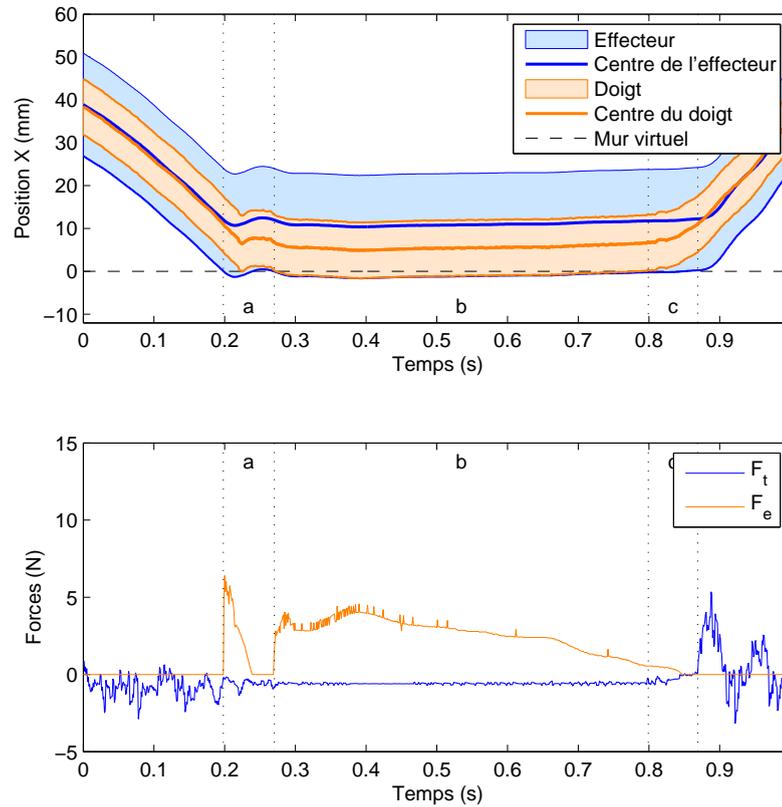


FIGURE 4.29: Déplacement unidimensionnel avec loi de commande à transition continue, sans suramortissement et amplitude de la vitesse à l'impact de 0,2 m/s. F_t : effort de suivi. F_e : effort issu de l'environnement.

virtuel. Dans la zone 4.28a, les efforts de suivi sont masqués par ceux de l'environnement, donc l'anneau s'immobilise (la périphérie de l'avatar du doigt n'est pas affichée car elle n'est pas prise en compte dans la loi de commande). L'influence de β est notable par le fait qu'il annule presque F_t lorsque le doigt est au voisinage de l'objet virtuel (zones 4.28a, b et c). Aucun pic d'effort sur F_t ou F_e n'est observé. Dans la zone 4.28b, F_e est restitué selon l'équation (4.6) et est moins bruitée que dans les expérimentations précédentes. Le comportement de cette loi de commande apparaît donc plus satisfaisant que celle basée sur une bascule simple.

Nous comparons maintenant le comportement de l'anneau avec et sans suramortissement avec une vitesse plus importante. Dans un premier temps, nous réitérons l'expérimentation précédente avec une vitesse de 0,2 m/s. Le résultat obtenu est affiché sur la figure 4.29.

Cette figure montre qu'à 200 ms l'anneau entre en collision avec l'environnement virtuel et rebondit une fois. Le doigt entre en collision avec l'anneau 30 ms plus tard et est emporté par ce dernier. Finalement, l'ensemble se stabilise à 290 ms. Le rebondissement fait paraître l'environnement plus élastique qu'il n'est : il n'est donc pas souhaitable.

La figure 4.30 présente l'enregistrement d'un essai similaire (à la vitesse de 0,2 m/s) avec suramortissement. Le coefficient d'amortissement B_{af} est réglé à 140 Ns/m (l'amortissement total,

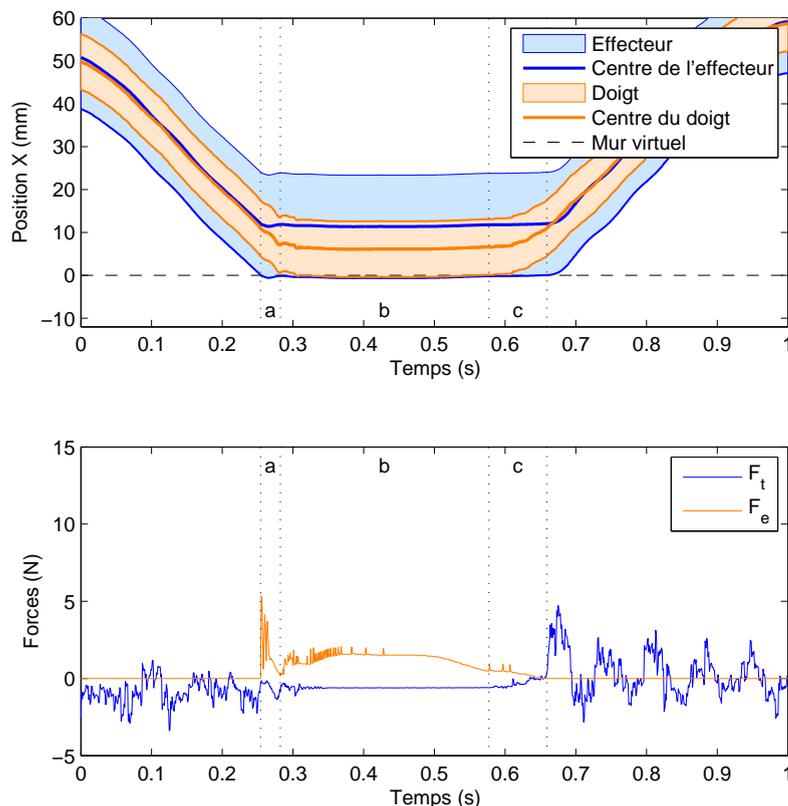


FIGURE 4.30: Déplacement unidimensionnel avec loi de commande à transition continue, avec suramortissement et amplitude de la vitesse à l'impact de 0,2 m/s. F_t : effort de suivi. F_e : effort issu de l'environnement.

incluant celui de l'environnement virtuel, est donc de 185 Ns/m). Cette fois l'anneau ne rebondit pas. Il se stabilise quasi-instantanément, de sorte qu'il est immobile lorsque le doigt entre à son contact 30 ms plus tard (zone 4.30a). L'effort issu de l'environnement virtuel est ensuite restitué normalement à l'utilisateur (zone 4.30b). La transition du contact à l'espace libre s'effectue comme précédemment (zone 4.30c). Le suramortissement permet ainsi de stabiliser efficacement l'anneau avant que le doigt n'arrive à son contact.

4.4.4 Conclusion

Dans ce paragraphe, nous avons d'abord analysé la loi de commande de la littérature et montré expérimentalement quelles sont ses limites. Une erreur sur l'estimation de la géométrie du contour du doigt dégrade la qualité de l'interaction entre l'utilisateur et l'environnement virtuel, et des pics d'effort apparaissent lors de la transition entre espace libre et contact. Nous avons ensuite modifié cette loi de commande pour rendre la transition plus continue. Cela n'a cependant pas permis de supprimer les comportements parasites de l'interface au contact. Finalement, nous avons proposé une loi de commande à transition continue, qui présente les avantages suivants :

- aucune discontinuité n'est ressentie par l'utilisateur ;

- l'impédance qu'il ressent au contact correspond toujours à celle de l'environnement virtuel ;
- cette loi de commande est indépendante des erreurs d'estimation de la géométrie du doigt si le coefficient β_{\min} est choisi de façon à ce que le décalage induit par l'effort de suivi résiduel soit faible devant les dimensions caractéristiques de l'environnement virtuel ;
- l'estimation dynamique de la géométrie du doigt n'est pas nécessaire, car les efforts de l'environnement dépendent uniquement du positionnement de l'avatar de l'anneau. Cet avantage est particulièrement utile pour diminuer le nombre de capteurs à utiliser pour estimer la géométrie du doigt, et donc simplifier la conception d'un effecteur pour le contact intermittent.

La loi de commande mise en place dans ce paragraphe fait ainsi une transition continue entre deux lois de commande en position, en espace libre et au contact. Les gains ont été réglés expérimentalement de façon à ce que le système soit stable dans son espace de travail. Les critères de stabilité de l'état de l'art s'appliquent donc pendant tout le fonctionnement du dispositif. En outre, en pratique nous n'observons aucune instabilité.

4.5 Tests utilisateurs

L'interface haptique que nous avons développée et la loi de commande que nous avons élaborée ont pour but de permettre une meilleure transparence en espace libre et une meilleure gestion de la transition entre espace libre et contact que sur les interfaces existantes. Dans ce paragraphe, nous vérifions cette hypothèse en demandant à dix sujets d'effectuer une tâche de violation de contrainte avec l'interface équipée tour-à-tour de deux effecteurs différents :

- un capuchon classique (Fig. 4.31, gauche), dont la partie interne peut être remplacée par une autre d'un diamètre différent en fonction du doigt de l'utilisateur (cinq capuchons différents, dont les diamètres varient de 15 à 19 mm, sont proposés). Dans ce cas, l'utilisateur est lié au système en permanence. Pour éviter que le doigt ne soit tordu pendant les mouvements 2D du robot, le capuchon interne peut tourner librement autour de l'axe de la phalange distale ;
- l'effecteur annulaire élaboré au chapitre précédent (Fig. 4.31, droite).

Nous détaillons ci-dessous le protocole utilisé et les résultats de l'expérimentation.

4.5.1 Protocole

Dans cette expérimentation, une tâche simple est simulée, durant laquelle l'utilisateur doit doucement bouger son index le long d'une ligne verticale jusqu'à ce qu'il rencontre un obstacle positionné à une distance inconnue de son point de départ. L'opérateur doit rétracter son doigt dès qu'il rencontre l'obstacle, de façon à appliquer le plus petit effort possible sur le mur et rester le moins longtemps possible à son contact. Cette tâche est effectuée avec l'interface équipée

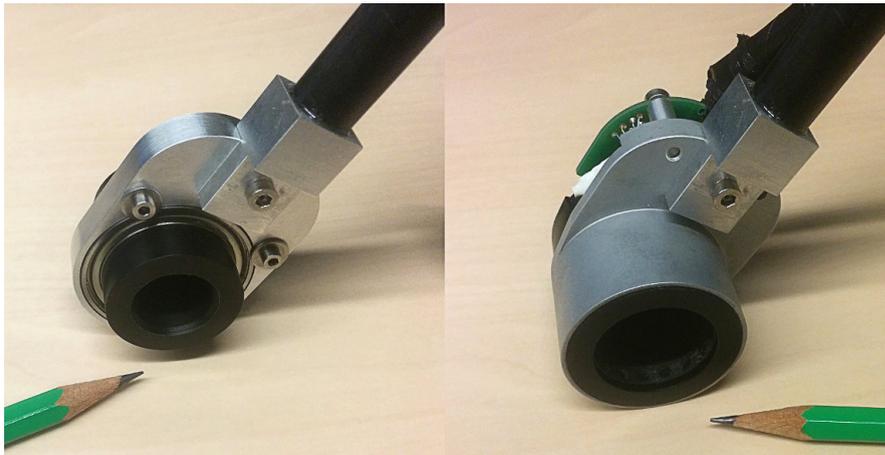


FIGURE 4.31 : Les deux types d'effecteurs utilisés dans l'expérimentation : un capuchon classique (gauche) et l'anneau adapté au contact intermittent (droite).

tour-à-tour du capuchon et de l'anneau adapté au contact intermittent. La durée du contact, l'effort maximal appliqué pendant le contact et la vitesse du doigt juste avant le contact (supposée refléter la confiance de l'utilisateur dans l'interface) sont enregistrées en parallèle.

L'expérimentation est réalisée en 2D. Avec le capuchon simple, les mouvements de l'utilisateur sont naturellement contraints dans le plan de mesure. Ce n'est pas le cas avec l'anneau adapté au contact intermittent qui laisse l'utilisateur complètement libre. Pour garder des conditions de mesure similaires, nous avons laissé suffisamment de temps aux sujets pour s'entraîner et être capables de déplacer leur doigt le long d'une ligne verticale sans en changer l'orientation ou sortir de l'anneau.

Dix sujets ont participé à l'expérimentation après avoir donné leur consentement (cinq hommes, cinq femmes, âgés entre 23 et 57 ans, un sujet gaucher). Tous étaient en bonne santé et ne présentaient pas de problème médical particulier. Leur connaissance des interfaces haptiques était diverse, entre novice et expert. Ils ont été récompensés pour leur participation, et le participant ayant obtenu les meilleurs résultats a reçu un bon de réduction.

Pour prévenir tout effet d'apprentissage, la moitié d'entre eux a commencé l'expérimentation par le capuchon simple puis a changé pour l'anneau adapté au contact intermittent, tandis que l'autre moitié a fait l'inverse. Pour chaque condition, il leur était demandé de s'asseoir sur une chaise en face d'un écran affichant une vue de l'environnement virtuel (voir Fig. 4.32). La position de leur doigt était affichée comme un disque blanc, ce qui les aidait à le déplacer verticalement en suivant une ligne droite verticale grise. Un panneau rigide leur cachait le robot. De plus, un casque antibruit les empêchait d'entendre tout bruit éventuel provenant des mouvements du robot.

Les sujets étaient informés du fait qu'ils allaient rencontrer un mur invisible positionné aléatoirement le long de la ligne droite, et qu'ils devaient se rétracter pour minimiser le contact avec



FIGURE 4.32: Setup expérimental. L'environnement virtuel est affiché sur un écran en face du sujet. Vert : murs virtuels de l'espace de travail. Noir : espace libre. Point blanc : position du doigt. Disque gris : point de départ. Soit avec le capuchon, soit avec l'anneau, les sujets devaient déplacer leur doigt verticalement à partir du point de départ le long de la ligne grise, et se rétracter dès qu'ils ressentaient un contact avec un mur invisible horizontal, placé aléatoirement. Un panneau rigide les empêchait de voir le robot pendant sa manipulation.

celui-ci ainsi que l'effort qu'ils appliquaient dessus. Une fois hors du mur, ils devaient repositionner leur doigt de façon à ce que son avatar soit dans la zone de départ, la position du mur changeait et un nouvel essai pouvait avoir lieu. La distance du mur au point de départ pouvait prendre les valeurs 5, 9, 13 ou 15 cm de manière aléatoire. De plus, il y avait des situations durant lesquelles il pouvait ne pas y avoir de mur. Dans ce cas, les sujets devaient entrer au contact du mur vert du fond de l'espace de travail, puis retourner au point de départ. Les sujets étaient également informés du fait que ce type de détection à l'aveugle était importante dans un grand nombre de situations, par exemple pour de la chirurgie mini-invasive en téléopération.

L'accent était mis sur la durée du contact et la force maximale appliquée, les deux devant être les plus petites possible. Pour chaque condition, chaque sujet a eu deux minutes pour enregistrer autant de mouvements que possible entre le point de départ et les murs, même si le nombre d'essais et la vitesse n'étaient pas particulièrement mis en valeur dans les instructions.

A la fin des expérimentations, les sujets devaient remplir un questionnaire pour évaluer le système avec le capuchon classique et avec l'anneau à contacts intermittents. Un espace leur était donné pour leurs commentaires et conseils généraux. Pour chaque condition, ils devaient également donner leur avis sur deux propositions : « Je pense que la condition X est adaptée pour

effectuer une tâche de téléchirurgie : 1) rapidement ; 2) tout en garantissant la sécurité du patient ». Ils devaient répondre sur une échelle de Likert à cinq points avec « Pas du tout d'accord », « Pas d'accord », « Ni d'accord ni pas d'accord », « D'accord », « Tout-à-fait d'accord ».

4.5.2 Résultats et discussion

Deux variables sont observées pour évaluer les performances des sujets avec le capuchon et avec l'anneau adapté au contact intermittent : la durée du contact et la force maximale appliquée. La vitesse juste avant le contact est également enregistrée. Elle est supposée rendre compte du niveau de confiance du sujet dans l'interface haptique et dans l'effecteur qu'il utilise : on fait l'hypothèse que plus il est confiant, plus il va vite.

L'interface haptique est équilibrée passivement, et les vitesses et accélérations considérées sont peu élevées. On néglige donc les effets inertiels. Pour les deux conditions, la force appliquée par l'utilisateur est mesurée comme l'opposée de la force de consigne F envoyée aux moteurs dès que l'effort de réaction de l'environnement n'est pas nul. Un faible seuil de détection est utilisé pour éviter les faux positifs, fixé à 0,02 N. Les contacts pendant lesquels l'amplitude de la force appliquée par l'utilisateur est supérieure à la moyenne des efforts appliqués sur l'ensemble des enregistrements plus trois fois leur écart-type, dans la condition la moins favorable, sont écartés. Par ailleurs, un contact est considéré comme valide si sa durée est supérieure à 50 ms (correspondant à une fréquence de 20 Hz, supérieure à la limite humaine dans ce type de mouvement (JONES 1997), et inférieure à 500 ms (basé sur l'observation des mesures aberrantes). Pour chaque sujet, le même nombre de détection de murs dans les deux conditions est utilisé (le plus petit nombre entre les deux conditions). Au global, sur l'ensemble des participants, 149 mesures valides ont été rassemblées pour chaque cas.

Comme chaque sujet effectue la tâche dans chaque condition, les couples de séries de mesures ne sont pas indépendantes. Par conséquent, des tests en T appariés sont utilisés pour comparer les résultats après avoir vérifié que les différences de durée des contacts, force maximale et vitesse sont distribuées normalement ($p < 0,05$) d'après un test en χ^2 . Pour chaque critère considéré (durée du contact, force maximale et vitesse avant impact) la moyenne et l'écart-type (ET) sont calculés sur les 149 mesures et pour chaque condition (capuchon et anneau pour le contact intermittent). Pour étayer la signification statistique des différences entre les deux conditions, une analyse en test T est effectuée. L'hypothèse nulle (aucune différence entre les deux conditions) est rejetée avec des probabilités de moins de 10^{-5} .

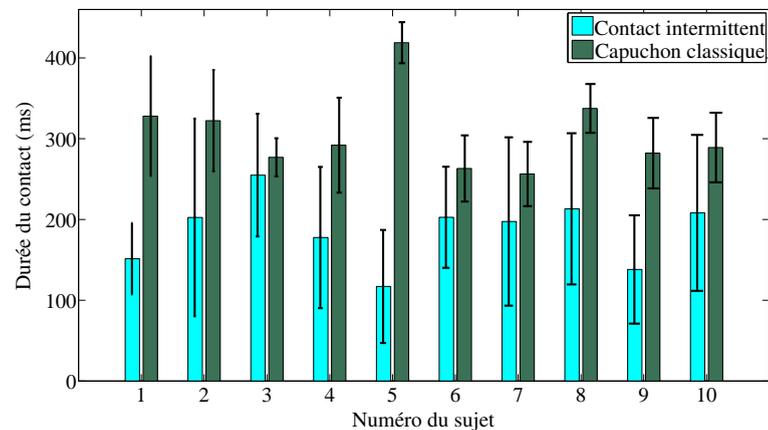


FIGURE 4.33: Moyennes et écarts-types des durées des contacts par utilisateur, en utilisant un anneau à contact intermittent, puis en utilisant un capuchon. Les barres d'erreur représentent les écarts-types.

Durées des contacts

Les durées des contacts obtenues dans les deux conditions sont présentées sur la figure 4.33 par utilisateur, en bleu pour le contact intermittent, en vert pour le capuchon. On remarque une nette séparation entre les deux conditions, avec des durées moyennes du contact avec le capuchon (moyenne = 294,5 ms, ET = 59,5 ms) significativement différentes du contact intermittent (moyenne = 194,1 ms, ET = 87,6 ms, $p < 10^{-5}$). Les écarts-types sont plus importants dans le cas du contact intermittent, même si ils restent du même ordre de grandeur.

Ce résultat montre que le contact intermittent permet une détection du contact plus rapide qu'un simple capuchon. Par ailleurs, la durée moyenne du contact correspond aux données de la littérature (RAMOS PEON et PRATTICHIZZO 2013) tout en étant supérieure aux temps de réaction obtenus avec une métaphore vibrotactile. Cela peut s'expliquer par le fait que dans ce paragraphe, l'utilisateur doit détecter activement le mur puis se rétracter, au lieu de seulement réagir à un stimulus émis par le robot.

Forces maximales

La figure 4.34 montre les forces maximales appliquées par utilisateur lors des contacts avec les murs dans les deux conditions. Le résultat obtenu suit l'intuition : pour chaque sujet, l'effort maximal appliqué est plus important en moyenne en utilisant le capuchon simple (moyenne = -0,68 N, ET = 0,31 N) qu'en utilisant l'anneau à contacts intermittents (moyenne = -0,31 N, ET = 0,26 N). Ici aussi, la différence est significative ($p < 10^{-5}$). Les déviations standard sont de même amplitude.

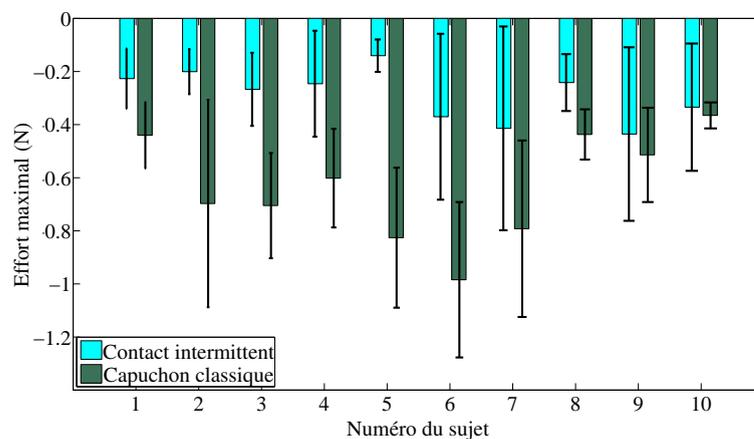


FIGURE 4.34: Moyennes et écarts-types des efforts de contact par utilisateur, en utilisant un anneau à contact intermittent, puis en utilisant un capuchon. Les barres d'erreur représentent les écarts-types.

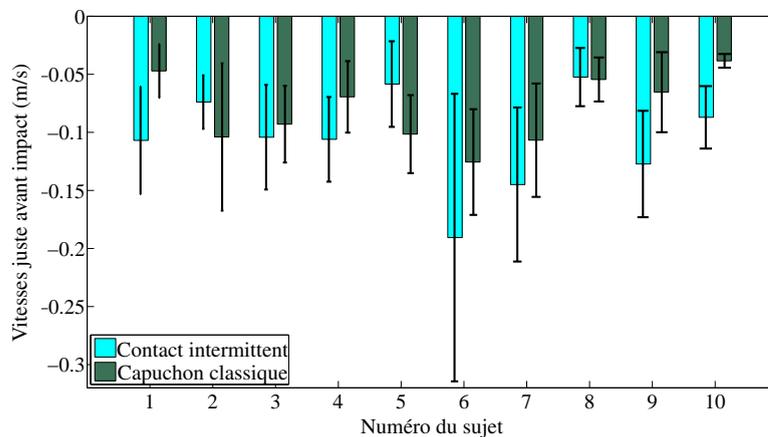


FIGURE 4.35: Moyennes et écarts-types des vitesses avant impact par utilisateur, en utilisant un anneau à contact intermittent, puis en utilisant un capuchon. Les barres d'erreur représentent les écarts-types.

Ce résultat suggère que le rendu du contact est plus naturel avec l'anneau à contact intermittent, améliorant la détection du contact.

Vitesses avant impact

Comme on peut le voir sur la figure 4.35, en moyenne, les vitesses avant impact sont un peu supérieures dans le cas de l'utilisation de l'anneau à contacts intermittents (moyenne = $-119,2$ mm/s, ET = $80,3$ mm/s) par comparaison avec le capuchon (moyenne = $-86,7$ mm/s, ET = $47,3$ mm/s). Le test T apparié confirme que la différence est significative ($p < 10^{-5}$).

De manière intéressante, la plupart des sujets ont indiqué qu'ils se sentaient plus confiants avec le capuchon qu'avec l'anneau, principalement parce que dans cette dernière condition ils devaient

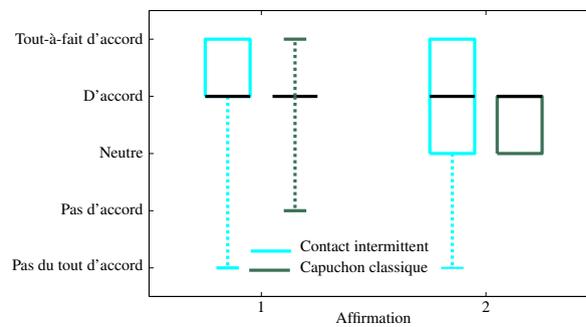


FIGURE 4.36: Résumé de l'analyse qualitative pour les deux conditions. L'évaluation par les participants de la performance et de la sécurité perçue du robot dans les deux conditions est représentée par la moyenne en noir. Les 25^{ème} et 75^{ème} quantiles sont les parties inférieures et supérieures des boîtes, respectivement. Les moustaches indiquent les réponses minimales et maximales. Affirmation 1 : vitesse. Affirmation 2 : sécurité (voir paragraphe 4.5.2).

plus se concentrer pour maintenir leur mouvement rectiligne et vertical. Ce résultat est donc inattendu, et peut trouver une explication dans le fait que même si l'interface avec anneau ne guide pas les sujets dans leurs mouvements, ils ne la ressentent pas du tout en espace libre, d'où des déplacements plus rapides.

Analyse qualitative

Les réponses collectées dans le questionnaire sont également analysées. Les participants devaient indiquer s'ils étaient d'accord ou non avec les affirmations : « Je pense que la condition X permet d'effectuer une tâche de téléopération chirurgicale : 1) rapidement ; 2) en toute sécurité pour le patient ». Les résultats sont rassemblés sur la figure 4.36.

On remarque que les sujets ont également apprécié le capuchon et l'anneau à contacts intermittents quant à leur utilisabilité pour une opération chirurgicale dans de bonnes conditions. Cependant, une plus grande dispersion est observée pour l'anneau à contacts intermittents. Ceci traduit la moindre confiance des utilisateurs dans cette condition, tel que mentionné dans le paragraphe précédent. Ils ont également exprimé des impressions mitigées quant au fait de savoir le robot proche de leur doigt sans le voir, tandis que l'interface équipée avec le capuchon est plus rassurante car elle est toujours au contact du doigt.

4.5.3 Conclusion

Ce paragraphe présente une expérimentation destinée à comparer les performances d'un panel d'utilisateurs au regard d'une tâche haptique 2D de détection de contact, d'abord en utilisant un capuchon classique installé à l'extrémité du robot, puis en utilisant l'effecteur élaboré au chapitre précédent et la loi de commande du paragraphe 4.4.3. Avec le premier, utilisé sur la plupart

des interfaces haptiques, les capteurs tactiles du pourtour du doigt sont saturés en permanence par le capuchon, le contact occasionnant un stimulus supplémentaire qui se combine avec cette sollicitation d'arrière-plan. Au contraire, l'anneau adapté au contact intermittent permet de déconnecter le robot de l'utilisateur en espace libre, ce qui assure une transparence parfaite du robot pendant cette phase de fonctionnement. Les récepteurs tactiles de l'utilisateur ne sont sollicités qu'au moment du contact, avec une sensation de contact naturelle combinant des retours tactile et kinesthésique, et seulement localisés au niveau de la surface du doigt en contact avec le robot.

Dix sujets ont participé à l'expérimentation. Les résultats montrent qu'avec un effecteur adapté au contact intermittent, les sujets détectent un contact plus rapidement et appliquent moins de force qu'avec un capuchon classique.

Bien que leur appréciation des deux effecteurs ait été bonne, les sujets se sont sentis moins en confiance avec l'effecteur à contact intermittent car ils le savaient à proximité de leur doigt et en train de le suivre sans pour autant le voir. Ils ont aussi mentionné le fait que cet effecteur était en fait plus difficile à utiliser que le capuchon classique étant donné que leur mouvement n'était pas contraint dans l'espace dans cette condition. Par conséquent, ils ont dû d'abord apprendre à effectuer des mouvements rectilignes verticaux sans changer l'orientation de leur doigt. Cependant, de manière intéressante, cela ne se voit pas sur leurs performances. Les mouvements enregistrés avec l'effecteur à contacts intermittents juste avant le contact sont plus rapides qu'avec le capuchon, bien qu'étant associés avec des efforts au contact moins élevés et des durées de contact plus faibles. On peut en conclure que l'effecteur à contacts intermittents leur permet d'effectuer une détection du contact avec un plus haut niveau de performance qu'un capuchon classique, bien qu'ils n'en soient pas conscients.

4.6 Conclusion

Ce chapitre montre comment une interface haptique de l'état de l'art a été utilisée pour construire une interface haptique à contacts intermittents. Dans ce but, un effecteur adapté à la mesure de position d'un doigt a été développé. La loi de commande de la littérature a été implémentée sur le système développé. Elle consiste en un mode de suivi de position activé lors des mouvements en espace libre, et un mode de restitution d'effort utilisé pour restituer à l'utilisateur les forces d'interaction avec un environnement virtuel. La transition entre les deux modes de commande est d'abord assurée par une bascule simple activée par la collision entre l'avatar du doigt et l'environnement virtuel, comme proposé dans la littérature.

Il est démontré que dans ce cas le système souffre de comportements indésirables lors de la transition entre les deux modes de commande, ces défauts étant amplifiés dès que le rayon du

doigt n'est pas parfaitement estimé. Dans tous les cas on observe des pics d'effort lors des transitions. Par ailleurs si le rayon du doigt est surestimé, ces forces d'impact sont plus élevées et des oscillations peuvent apparaître pendant les transitions entre contact et espace libre. Au contraire, si le rayon du doigt est sous-estimé, l'opérateur sent une raideur parasite lorsque son doigt approche ou quitte l'environnement virtuel.

Une loi de commande avec transition douce est proposée pour résoudre les problèmes soulevés. L'approche développée est basée sur deux caractéristiques. Tout d'abord, elle ne dépend pas de l'estimation du rayon du doigt. Au contraire, la force d'interaction est calculée à partir de la géométrie de l'anneau, qui est constante et connue. Ensuite, plutôt que de basculer entre suivi de position en espace libre et restitution d'un effort au contact, nous introduisons un gain adaptatif. Il modère l'influence de l'effort de suivi de manière linéaire en fonction de la proximité entre l'avatar du doigt et l'objet virtuel. Une comparaison expérimentale entre les deux stratégies montre que la loi de commande proposée présente de meilleures performances tout en étant plus robuste car elle est indépendante des paramètres géométriques du doigt. En outre, un système de suramortissement est mis en place afin de garantir que l'anneau est immobile au moment où le doigt entre à son contact, au moyen d'un amortissement supplémentaire actif uniquement lors de la transition entre espace libre et contact.

Finalement, l'efficacité de l'interface pour la restitution des contacts avec un environnement est testée à travers la comparaison des performances de dix sujets vis-à-vis d'une tâche de détection de contact. L'interface est tour-à-tour équipée de l'effecteur pour le contact intermittent développé au chapitre précédent, et d'une capsule simple introduisant une liaison mécanique permanente comme pour toute interface classique. Les résultats obtenus montrent que même si l'utilisation de l'interface 2D à contacts intermittents est moins intuitive qu'une interface 2D classique, le contact est détecté plus rapidement et les efforts appliqués sur l'environnement sont moindres.

Plusieurs pistes permettraient d'améliorer ces résultats. Tout d'abord, comme la loi de commande proposée permet de s'affranchir d'une modélisation du doigt, la conception d'un effecteur permettant un suivi dans l'espace pourrait être simplifiée intégrant le moins de capteurs possible. Ensuite, l'extension de ce principe à un système suivant en 3D les mouvements d'un ou plusieurs doigts dans un espace de travail plus conséquent permettrait d'augmenter le nombre d'applications. Enfin, de nouvelles expérimentations dans le cadre de tâches de chirurgie permettraient de confirmer que la transparence en espace libre et l'augmentation du réalisme de la transition entre espace libre et contact permet d'augmenter les performances et garantit une meilleure immersion du chirurgien dans la simulation.

Chapitre 5

Choix des zones de la main à considérer pour la conception d'une interface dextre

5.1 Introduction

Les interfaces haptiques dextres permettent d'interagir plus naturellement avec un environnement virtuel, car elles permettent d'interagir directement avec un ou plusieurs doigts (SHIMOGA 1993a). Bien que les directives pour leur conception soient nombreuses (voir paragraphe 2.3), il n'existe parmi elles aucune méthode pour définir les zones de contacts à prendre en compte. Ce chapitre propose une réponse à ce problème à travers une observation systématique des zones de contact de la main utilisées et du temps d'utilisation de ces zones en regard d'un ensemble de tâches à effectuer.

La main est d'abord divisée en plusieurs zones de contact en fonction des taxonomies de manipulation et d'exploration existantes. Ces surfaces sont pondérées par leur fréquence d'utilisation. Les résultats sont rassemblés dans des cartes d'interaction, puis réarrangés dans un arbre d'interaction quantifiant les interactions possibles en fonction du nombre de zones de contact considérées dans la conception d'une interface. L'état de l'art des interfaces haptiques génériques est enfin repris et classé en fonction des zones de contact prises en compte dans leur conception.

5.2 Analyse des zones de contact de la main : construction d'une carte des interactions manuelles

Les interactions dextres avec l'environnement ont généralement pour but soit d'explorer cet environnement pour mieux le connaître, soit de manipuler certains objets, ce qui a pour conséquence de le modifier. Ces modes d'interaction sont examinés ci-dessous.

5.2.1 Manipulation

Les objets sont d'abord saisis avant d'être manipulés. Le type de prise en main est directement lié à l'utilisation que l'on veut faire de ceux-ci. Manipulation et préhension sont donc directement liées et nous nous intéressons ici à la seconde, qui a donné lieu à une littérature abondante en physiologie et en ergonomie (KAMAKURA et al. 1980 ; NAPIER 1956 ; TAYLOR et SCHWARTZ 1955). Dans ce contexte, les travaux de (CUTKOSKY 1989) sont utilisés comme base pour la conception de prothèses et mains robotiques. Cet auteur a proposé une taxonomie comptant 16 types de prises différents, en distinguant les prises de précision et les prises de puissance classées selon l'habileté nécessaire pour effectuer la tâche et la précision requise. Cependant, cette taxonomie n'inclut pas certaines prises comme la saisie d'un stylo. Par ailleurs, dans la pratique, les utilisateurs adoptent de nombreuses variantes de ces prises dans la vie de tous les jours en fonction du contexte (tailles de la main et de l'objet, préférences personnelles). Pour palier ces limitations, (FEIX et al. 2009) ont proposé une classification plus complète incluant des prises intermédiaires. Ils différencient également les types de prise en fonction de la posture de la main. La manipulation d'objets peut être encore décrite de façon plus complète en tenant compte des mouvements de la main et/ou de l'objet, notamment à l'intérieur de la main. Une taxonomie intégrant ces éléments a été proposée dans (BULLOCK, MA et DOLLAR 2013). Cependant, cette classification est moins détaillée pour la manipulation préhensile. Nous avons donc choisi dans ce chapitre d'utiliser la taxonomie de Cutkosky comme base de travail. La taxonomie de Feix et al. est également utilisée pour améliorer la précision de la description des différentes prises (Figure 5.1). Chaque type de prise est appelé $C_{i \in [1,16]}$ ou $F_{j \in [17,34]}$ en fonction de son appartenance à la taxonomie de Cutkosky ou à celle de Feix et al. (les correspondances entre les dénominations et les noms des prises sont rassemblées dans le tableau 5.1). Exception faite de la *prise plateau* de Cutkosky (C_{15}), les prises non préhensiles ne sont pas incluses. Cette classification est aisément lisible et fournit un aperçu assez large des différentes prises utilisées pour la manipulation d'objets car elle prend en compte les prises de puissance, intermédiaires et de précision.

Pour chaque type de prise, on commence par identifier la surface de contact entre la main et l'objet saisi (figure 5.1). Cette information est intégrée à la taxonomie précédente, l'arbre des

interactions étant trié verticalement selon la surface de la zone de contact de la main. On trouve ainsi en bas l'utilisation de deux phalanges distales uniquement, et en haut la totalité de la surface interne de la main. Les prises de puissance sont représentées à gauche et celles de précision à droite, les prises intermédiaires se trouvant au milieu. Cette présentation fait ressortir certaines des particularités des taxonomies déjà mises en lumière par ailleurs, comme par exemple l'utilisation des seules extrémités des doigts pour les prises de précision, de certaines surfaces latérales dans la majorité des prises intermédiaires, et de la plus grande partie de la peau glabre pour les prises de puissance. On note également qu'une même surface de contact peut être utilisée pour différents types de prises. C'est le cas pour la prise *quatre doigts* (C_6) et la prise *sphère de précision* (C_{13}), même si ces prises diffèrent par la géométrie de l'objet tenu en main.

TABEAU 5.1: Liste des types de prise considérées dans ce chapitre, à partir de (CUTKOSKY 1989) et de la base de données de Feix et al. (*grasp.xief.net*).

Non Préhensile & Puissance		Intermédiaire		Précision	
Libellé	Prise	Libellé	Prise	Libellé	Prise
C ₁	Grand diamètre	C ₁₆	Pincement latéral	C ₆	Pouce et quatre doigts
C ₂	Petit diamètre	F ₂₁	Tripode d'écriture	C ₇	Pouce et trois doigts
C ₃	Enveloppe moyenne	F ₂₂	Variation tripode	C ₈	Pouce et deux doigts
C ₄	Adduction du pouce	F ₂₄	Prise d'adduction	C ₉	Pouce et index
C ₅	Outil léger	F ₂₆	Tripode latéral	C ₁₂	Disque (précision)
C ₁₀	Disque (puissance)	F ₃₀	Bâton	C ₁₃	Sphère (précision)
C ₁₁	Sphère (puissance)	F ₃₃	Ventral	C ₁₄	Tripode
C ₁₅	Crochet, prise plateau			F ₂₅	Pincement du bout des doigts
F ₁₇	Crochet fixe			F ₂₈	Quadrupode
F ₁₈	Extension de l'index			F ₃₄	Pincement inférieur

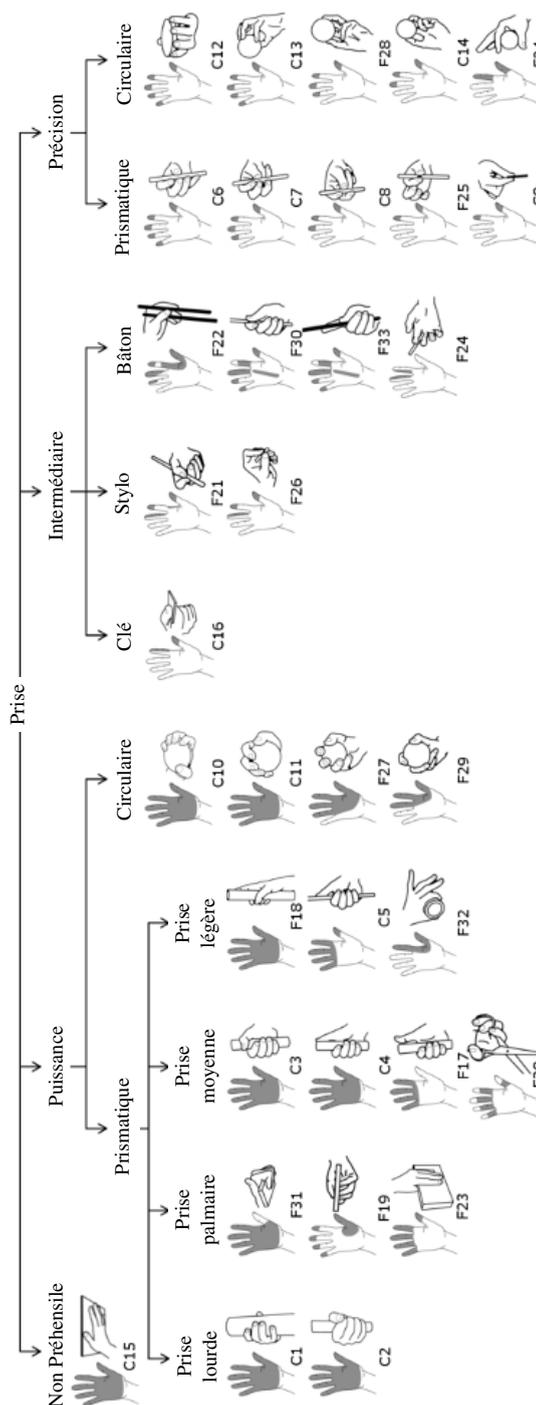


FIGURE 5.1: Taxonomie de manipulation complète et surfaces de contact correspondantes.

Cette présentation des prises et surfaces de contact est réorganisée sur la figure 5.2. Les zones de la main impliquées dans la manipulation sont classées par lignes en fonction croissante de la surface de peau mise en jeu et dénommées M_1 à M_{21} . En tout, on distingue 21 surfaces de contact, des parties latérales de l'index et du majeur à la totalité de la surface interne de la main. Les prises correspondantes sont classées par colonnes. Les prises qui font appel à la même surface de contact sont groupées. Elles sont connectées aux surfaces de contact correspondantes par les cases en gris sombre : une prise donnée (dans la colonne de la case gris sombre) peut être effectuée si la surface de contact correspondante (dans la ligne de la case gris sombre) est impliquée. À l'inverse, une surface de contact donnée permet d'effectuer toutes les prises correspondantes. Ces zones sont inclusives, comme indiqué par les cases en gris clair. Par exemple, les cinq doigts de la main (M_6) permettent d'effectuer les prises à cinq doigts (C_6 , C_{12} et C_{13}), mais aussi toute prise pouvant être effectuée par l'utilisation des quatre extrémités des doigts (C_7 , F_{28}), trois doigts (C_8 , C_{14}) et deux doigts (C_9 , F_{25}). De façon similaire, la prise *sphère trois doigts* (F_{29}) peut être effectuée pourvu que le pouce, l'index, le majeur et la surface latérale de la paume au moins soient impliqués, ce qui est le cas avec les surfaces M_{18} , M_{19} et M_{21} . La totalité de la main (M_{21}) donne accès à la totalité des 34 prises considérées.

Cette figure montre que le nombre de prises possibles augmente avec la taille de la surface de contact. Cependant, elle ne permet pas de juger de l'importance relative de chaque surface ou prise. Nous définissons celle-ci, pour une surface donnée, comme le temps où elle est utilisée sur le temps total d'interaction de l'utilisateur avec son environnement (c'est-à-dire sa fréquence d'utilisation). Peu d'informations sont disponibles quant aux fréquences d'utilisation des différentes prises dans la vie de tous les jours. (TAYLOR et SCHWARTZ 1955) fournissent une répartition de l'utilisation de six prises et montrent par exemple qu'un *tripode latéral* (F_{26} , appelé *prise palmaire*) est plus utilisé que la prise *pouce et index* et que le *pincement latéral* (C_9 et C_{16} respectivement). Cela justifie la conception de la plupart des mains artificielles (TAYLOR et SCHWARTZ 1955) et correspond à l'intuition. Cependant, cette étude ne fournit pas des données suffisamment détaillées. Dans une récente publication, (ZHENG, DE LA ROSA et DOLLAR 2011) ont mis en place une procédure expérimentale visant à enregistrer et analyser les activités d'un individu dans son environnement de travail habituel pendant une durée relativement importante. Des personnes effectuant des tâches ménagères et des travaux d'atelier ont été enregistrées et les manipulations correspondantes ont été classées en utilisant les taxonomies de Cutkosky et de Feix et al. Les fréquences d'utilisation des différentes prises sont aussi fournies. Ces informations sont ici croisées avec les surfaces de contact caractéristiques de la figure 5.1 afin d'en déduire le temps $T_{\%M_j}$ pendant lequel une surface de contact M_j est utilisée :

$$T_{\%M_j} = \sum_k T_{\%(C_k \text{ ou } F_k)} \quad (5.1)$$

avec $T_{\%(C_k \text{ ou } F_k)}$ le temps pendant lequel une prise (C_k ou F_k) mettant en jeu M_j est utilisée.

derniers, on constate qu'un certain équilibre entre prises de puissance et de précision conduit à une plus grande distribution des fréquences d'utilisation. On constate par ailleurs que dans les deux cas, la surface de contact (M_2) correspondant au *pincement latéral* (C_{16}), déjà mentionné auparavant dans (TAYLOR et SCHWARTZ 1955) comme présentant une certaine importance par rapport aux autres, est la deuxième surface la plus utilisée même si elle ne correspond qu'à un seul type de prise.

Ces résultats prennent tout leur sens une fois cumulés sur des cartes d'interaction (figure 5.3, gauche). L'intérieur de la main est divisé en zones d'interaction élémentaires A_i obtenues par superposition des frontières de toutes les zones d'interaction. La fréquence d'utilisation cumulative $T_{\%cA_i}$ d'une surface de contact élémentaire A_i est donnée par l'équation suivante :

$$T_{\%cA_i} = \sum_{j \setminus A_i \subset M_j} T_{\%M_j} \quad (5.2)$$

$j \setminus A_i \subset M_j$ signifie que la fréquence d'utilisation d'une surface de contact M_j donnée est prise en compte dans le calcul correspondant à une surface A_i seulement si A_i est incluse dans M_j . $T_{\%cA_i}$ est représentée en niveau de gris sur la figure 5.3. On obtient ainsi des cartes très riches mais relativement complexes. On peut cependant remarquer que certaines zones ont des fréquences d'utilisation similaires, ce qui permet de simplifier ces cartes d'interaction (figure 5.3, droite). La paume compte par exemple plusieurs zones dont les fréquences d'utilisation s'étendent de 22% à 28% pour les travaux d'atelier (de 58% à 61% pour les tâches ménagères) avec une différence de moins de 3% entre zones adjacentes. Cela permet de les regrouper sans perdre d'information importante. Il en est de même pour les surfaces du métacarpe, dont les plages de fréquence varient entre 33% et 29% pour les travaux d'atelier ([59%; 63%] pour les tâches ménagères). Nous divisons ainsi la main en douze *zones d'interaction simplifiées*.

Bien que les données de base correspondent à un métier spécifique et ne permettent pas de rendre compte d'un comportement général sur l'ensemble des activités humaines, ces résultats font apparaître des similitudes qui permettent de tirer certaines conclusions. En effet, lorsque l'on analyse ces résultats dans leur ensemble en étudiant les différences de contraste entre les niveaux de gris des différentes zones, on constate tout d'abord que les phalanges distales sont les zones privilégiées de la manipulation, en comparaison du reste des doigts et du métacarpe (qui viennent en second) et de la paume et de la partie ulnaire de la main. Cela correspond à l'intuition et aux conclusions de (TAYLOR et SCHWARTZ 1955) et des autres chercheurs. Cela justifie aussi les conceptions des interfaces haptiques génériques qui suivent le mouvement des doigts et appliquent généralement des efforts à leurs extrémités seulement.

Lorsque l'on regarde ensuite ces résultats plus en détail en s'intéressant au niveau de gris de chacune des zones, on constate que chaque phalange distale n'est pas utilisée de la même façon. Celle du pouce intervient dans 98% à 99% du temps de manipulation total. Celle de l'index est

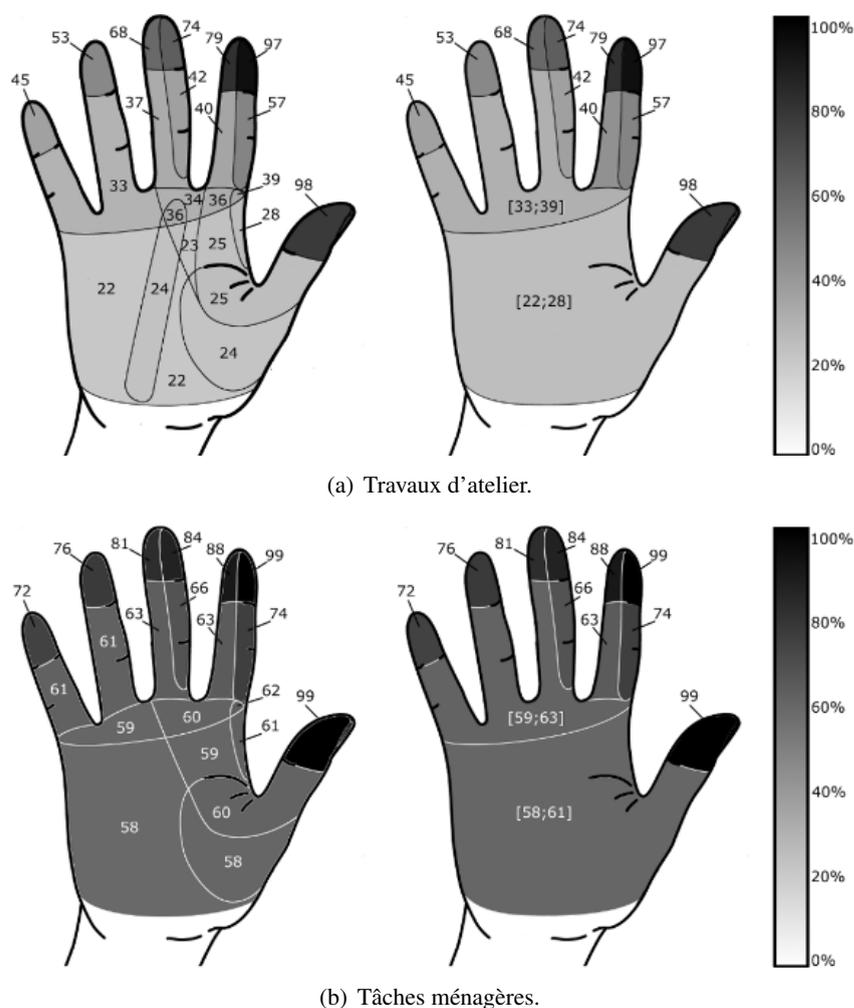


FIGURE 5.3: Cartes d'interaction pour la manipulation obtenue à partir de l'équation (5.2) (gauche), et les zones d'interaction simplifiées correspondantes (droite). Les fréquences d'utilisation (pourcentages) sont affichées à la fois en chiffres et niveau de gris (exemples à partir de (ZHENG, DE LA ROSA et DOLLAR 2011)).

la seconde plus importante, suivie de celle du majeur. Celles de l'annulaire et de l'auriculaire sont moins sollicitées. Finalement, la surface latérale externe de l'index retient l'attention car elle est utilisée avec la même fréquence que la phalange distale de l'annulaire, bien qu'elle ne soit impliquée que dans un seul type de prise : *pincement latéral* (C_{16}). Cette zone de contact pourrait donc être prise en compte pour la conception d'interfaces haptiques génériques.

5.2.2 Exploration

Les mouvements permettant d'évaluer les caractéristiques d'un matériau présentent certaines invariances (JONES et LEDERMAN 2006). Ils ont été groupés en six procédures exploratoires (figure 5.4, deuxième ligne). Chacune est optimale pour la détermination d'un certain type d'information :

Surfaces de contact de la main pendant l'exploration		Types de prises exploratoires [Lederman et Klatzky, 1987]					
		K3	K5	K4	K1	K2	K6
E4		14.3%					
E3			9.5%				
E2					14.3%		
E1							61.9%

FIGURE 5.4: Vue d'ensemble des procédures exploratoires accessibles en fonction des zones de contact de la main (JONES et LEDERMAN 2006).

- le *mouvement latéral* (K_1), lors duquel l'extrémité des doigts (en général le pouce, l'index et le majeur) est déplacée sur la surface d'un objet en frottant sur celle-ci, est utilisé pour acquérir de l'information sur la texture d'un objet ;
 - la dureté est évaluée en effectuant un mouvement de *pression* (K_2). Le sujet applique des forces normales à la surface de l'objet, généralement avec une ou plusieurs phalanges distales ;
 - un *contact statique* (K_3) permet d'évaluer la température d'un objet. La main repose sur l'objet avec une surface de contact maximale, excepté dans les situations perçues comme potentiellement dangereuses où le sujet commence par approcher une surface plus réduite de sa main ;
 - l'évaluation du poids d'un objet est effectuée par le *soupèsement* (K_4). L'objet est tenu en main et déplacé de haut en bas avec le bras ou le poignet ;
 - le geste d'*englobement* (K_5) permet d'avoir un aperçu global de la forme et du volume d'un objet. La main est mise en contact avec la plus grande partie possible de la surface externe de l'objet ;
 - enfin, la forme globale et exacte d'un objet peut être évaluée en effectuant un geste de *suivi de contour* (K_6). La main se déplace autour de l'objet tout en restant en contact avec celui-ci.
- Les surfaces de contact correspondantes sont extraites selon le même principe que précédemment et dénommées E_1 à E_4 (certains gestes d'exploration partagent la même zone de contact). Bien qu'elles puissent varier selon la taille et la forme de l'objet et que dans la plupart des cas, plusieurs informations puissent être acquises simultanément lors de l'exploration d'un objet, ou avec un doigt différent, on choisit ici d'utiliser les objets considérés par Lederman.

Comme précédemment, la connaissance des fréquences d'utilisation des mouvements K_1 à K_6 est nécessaire pour rendre compte de l'importance relative des zones de contact de la main E_1 à E_4 . Cette information peut être indirectement obtenue à partir de (JONES et LEDERMAN 2006), qui indique les durées moyennes des six procédures exploratoires. Chaque mouvement est adapté à une propriété particulière. Par conséquent, il est nécessaire de tous les effectuer pour

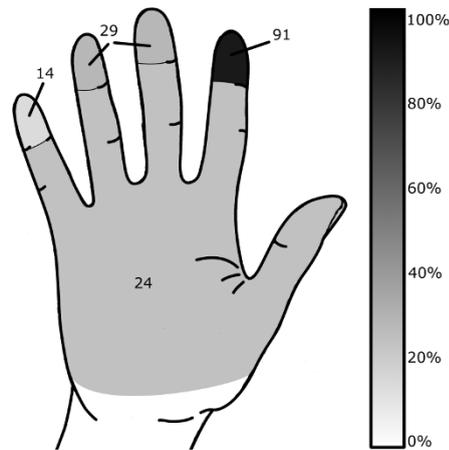


FIGURE 5.5: Carte d'interaction pour l'exploration manuelle (%).

caractériser complètement un objet. On considère donc ici que leurs fréquences d'utilisation peut être calculée comme leur durée moyenne divisée par le temps moyen nécessaire à la réalisation de tous les mouvements exploratoires (figure 5.4 : K_1 (3 s), K_2 (2 s), K_3 (<1 s), K_4 (2 s), K_5 (2 s), K_6 (11 s)).

Ces fréquences d'utilisation sont rassemblées de la même manière que pour les prises associées à des tâches de manipulation et indiquées dans les cases gris sombres de la figure 5.4. L'index (E_1) est le plus utilisé car il est impliqué dans la plupart des mouvements, dont le plus long d'entre eux (le *suivi de contour*). Le centre de la main (E_3), impliqué uniquement dans le *soufflement* pendant un temps très court, est moins sollicité.

Ces données peuvent être utilisées pour mettre en place une carte d'interaction de la main pour l'exploration. À l'instar de la manipulation, des zones de contact élémentaires peuvent d'abord être définies en juxtaposant les frontières des zones de contact E_1 à E_4 . Leurs fréquences d'utilisation cumulatives sont données par :

$$T_{\%cA_i} = \sum_{j \setminus A_i \cap E_j} T_{\%E_j} \quad (5.3)$$

(où $T_{\%E_j}$ est le pourcentage de temps pendant lequel une surface de contact E_j est utilisée et $j \setminus A_i \cap E_j$ signifie que la fréquence associée à E_j n'est prise en compte que si A_i est incluse dans E_j). Elles sont représentées sur la figure 5.5. Ici la distribution des fréquences d'utilisation des zones de contact correspond à l'intuition : l'extrémité de l'auriculaire est la moins utilisée tandis que celle de l'index est la plus impliquée.

5.2.3 Carte d'interaction globale

Les interactions manuelles impliquant des contacts avec l'environnement sont composées de tâches d'exploration et de manipulation. On suppose donc que tout panel de tâches peut être

caractérisé par un certain ratio exploration / manipulation, cette dernière pouvant être grossière ou plus fine comme le montrent les deux cartes d'interaction de la figure 5.3. Elles décrivent deux comportements manipulatoires différents : lors de tâches ménagères, on réalise principalement des tâches de manipulation grossières impliquant des prises de puissance tandis que lors de travaux d'atelier, on réalise des activités techniques plus délicates avec à la fois des prises de puissance et de précision. Ainsi, toute activité impliquant la saisie et la manipulation d'objets peut être exprimée comme une combinaison de ces deux types d'activités et les fréquences associées obtenues en faisant un ratio de ces deux cartes d'interaction. Par extension, toute carte correspondant à un panel d'interactions peut être approximée par un ratio entre les trois cartes des figures 5.3 et 5.5 (manipulation : tâches ménagères et travaux d'atelier, exploration).

La figure 5.6 est obtenue par ce principe. Elle détaille les variations des fréquences d'utilisation des zones d'interaction manuelles en fonction du ratio entre deux cartes d'interaction (le long des axes bidirectionnels externes) et entre les trois cartes d'interaction (au centre). Dans ce dernier cas, un comportement moyen est obtenu à partir de combinaisons des trois cartes d'interaction avec des ratios variant entre 25% et 50%. Il peut aussi être obtenu en calculant un intervalle d'utilisation pour chaque zone d'interaction prise séparément en combinant les fréquences d'utilisation pour les travaux d'atelier, les tâches ménagères et l'exploration avec la même variation des ratios (à titre d'exemple, M_4 est utilisée 14,7%, 4,1% et 0% du temps pour respectivement les travaux d'atelier, les tâches ménagères et l'exploration). Une combinaison de ces valeurs avec des ratios variant entre 25% et 50% conduit à une variation générale de la fréquence d'utilisation de M_4 dans l'intervalle [4,7%; 8,4%]. Les zones d'interactions simplifiées correspondantes étant les extrémités du pouce, de l'index (parties gauche et droite) et du majeur (parties gauche et droite), cet intervalle peut être compté pour ces cinq zones d'interaction et ajouté aux contributions des autres surfaces de contact contenant cette zone.

Cette carte d'interaction générale fournit un aperçu de l'utilisation de la main pour n'importe quel type d'activité manuelle. Elle illustre des comportements d'interaction cohérents. C'est-à-dire que l'extrémité de l'index est la plus utilisée, vient ensuite celle du pouce (bien que sa fréquence d'utilisation varie plus que pour le reste des phalanges distales), celle du majeur puis celle de l'annulaire (leur variation est similaire à celle de la surface latérale externe de l'index). L'extrémité de l'auriculaire apparaît utilisée avec la même fréquence que le métacarpe. La paume est moins impliquée.

Ces données résultent de l'application d'une approche directe basée sur des considérations ergonomiques et comportementales qui fournissent des informations sur les zones de contact de la main les plus utilisées. Le paragraphe suivant a pour but de corrélérer celles-ci avec une approche indirecte basée sur un examen de la densité de mécanorécepteurs dans la peau glabre.

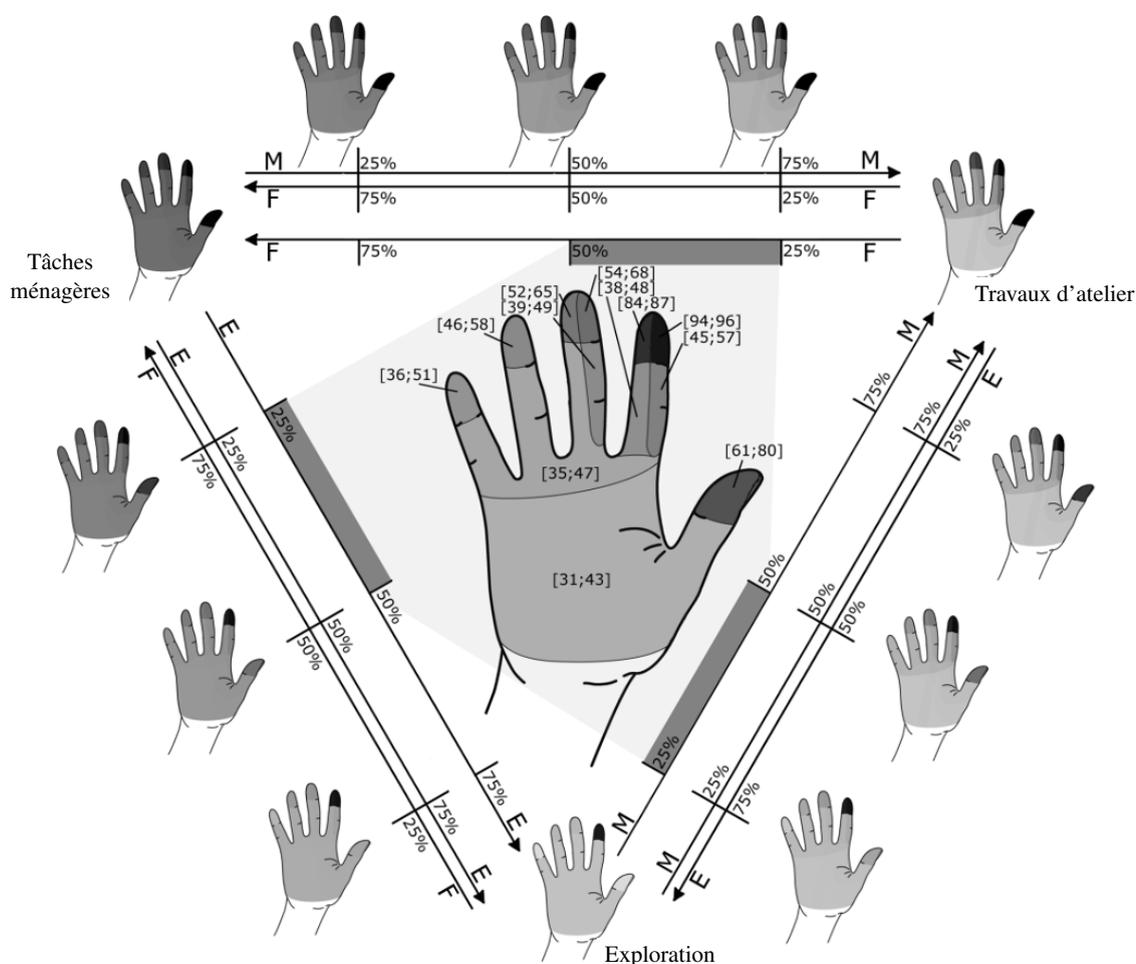


FIGURE 5.6: Variations des fréquences d'utilisation pour les zones d'interaction simplifiées de la main dans l'espace défini par les trois cartes d'interactions des figures 5.3 et 5.5. Chaque axe bidirectionnel extérieur correspond à une combinaison des deux cartes d'interaction à ses extrémités, tandis que le centre présente une combinaison des trois cartes d'interaction avec des pondérations variant de 25% à 50%.

5.2.4 Système sensoriel de la peau glabre

La peau glabre de la main intègre un grand nombre de mécanorécepteurs dont on peut supposer que la densité reflète l'importance de chaque surface dans le processus sensorimoteur. Dans la littérature, on distingue quatre types de mécanorécepteurs (LEDERMAN et KLATZKY 2009) :

- (A) les afférents FA I (*Fast Adapting type I*) sont terminés par les corpuscules de Meissner et répondent aux déformations transitoires et à haute fréquence de la peau. Ils sont importants pour la détection des contours et des détails spatiaux fins. Ce sont les mécanorécepteurs les plus nombreux ;
- (B) les afférents SA I (*Slowly Adapting type I*) sont terminés par les corpuscules de Merkel. Ils sont sensibles aux déformations dynamiques basse fréquence de la peau, aux forces statiques, et jouent un rôle clé dans l'interaction tactile et la maîtrise du retour d'effort ;

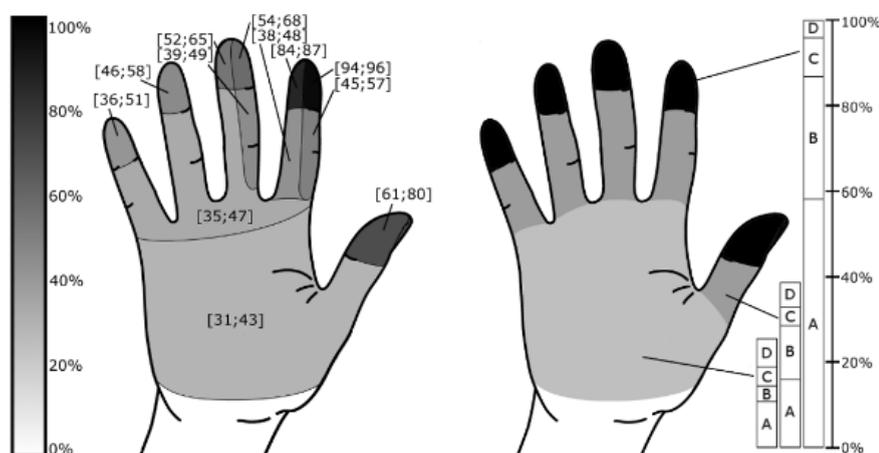


FIGURE 5.7: Carte générale des zones d'interaction simplifiées et de leurs fréquences d'utilisation, comparées aux pourcentages des densités maximales cumulées des quatre unités afférentes : FA I (A), SA I (B), FA II (C), SA II (D) (à partir de (VALLBO et JOHANSSON 1984)).

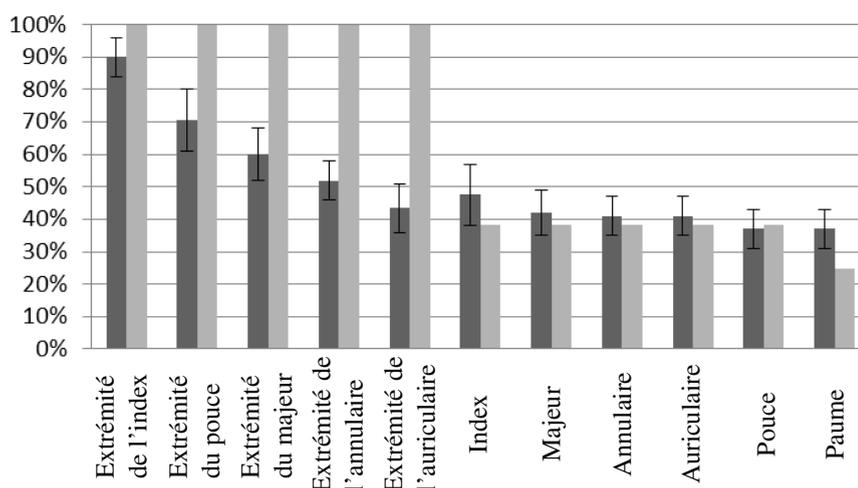


FIGURE 5.8: Corrélations entre les pourcentages d'utilisation des zones de la main (gris sombre, avec indicateurs mini et maxi) et la densité des mécanorécepteurs (gris clair). Pour les barres gris clair, 100% correspond à la densité maximale de mécanorécepteurs sur toutes les zones.

- (C) les afférents FA II (*Fast Adapting type II*) sont terminés par les corpuscules Paciniens. On les localise plus profondément dans le derme. Ils sont spécialisés dans la détection des vibrations et des stimulations transitoires. Ils sont très importants pour la détection d'événements à distance comme les informations provenant d'outils tenus en main ;
- (D) enfin, les afférents SA II (*Slowly Adapting type II*) se terminent par les corpuscules de Ruffini dont on suppose qu'ils jouent un rôle dans la perception du mouvement d'un objet et dans l'appréciation de son poids. Ils sont sensibles à l'élongation de la peau.

La figure 5.7 fournit une carte générale des zones d'interactions simplifiées (gauche) en vis-à-vis d'une carte indiquant les densités cumulées des quatre afférents de la peau glabre (droite). Elle montre la densité des mécanorécepteurs présents sur le reste de la main. Plus de 70% des afférents présents sont des FA I et SA I, sensibles à la déformation de la peau et aux forces

statiques. La densité des récepteurs du reste de la peau des doigts est moitié moindre, et la paume est relativement pauvre en récepteurs cutanés. Cette information peut être utilisée pour déterminer les zones pour lesquelles il est important de s'assurer que les mécanorécepteurs soient sains, comme mis en avant par (TUBIANA 1984).

On constate que les fréquences d'utilisation sont assez bien corrélées avec les densités des mécanorécepteurs (figure 5.8). Les extrémités des doigts sont les plus denses et les plus utilisées, viennent ensuite le métacarpe puis la paume. Cependant, il apparaît quelques valeurs aberrantes. La plus importante concerne les phalanges distales dont la densité de mécanorécepteurs est sensiblement la même, tandis que la fréquence d'utilisation décroît linéairement de l'index à l'auriculaire. Cela pourrait s'expliquer par un usage accru des doigts proches du pouce, pour des raisons mécaniques et liées au confort de saisie et d'utilisation des objets.

5.3 Analyse des capacités manuelles : construction d'un arbre d'interactions

Les cartes d'interaction présentées dans le paragraphe précédent offrent un aperçu de la manière dont la main est habituellement sollicitée, mais pas des activités qui peuvent être effectuées en fonction des zones de contact mises en jeu. Ce paragraphe a pour but de fournir un outil permettant d'obtenir cette information.

5.3.1 Arbre d'interactions général

Afin de résoudre ce problème, on commence par associer aux vingt-quatre surfaces de contact des figures 5.2 et 5.4 (M_1 à M_{21} et E_1 à E_4 avec $M_{21} = E_4$) des intervalles indiquant la fréquence d'utilisation des interactions qu'elles permettent. Elles rendent ainsi compte de leur potentiel d'efficacité à autoriser des interactions manuelles génériques :

- pour les surfaces de contact qui n'en recouvrent pas d'autres, ces intervalles sont calculés directement comme les limites hautes et basses des sommes pondérées des données des figures 5.2 et 5.4, en supposant qu'un comportement moyen est obtenu à partir d'une variation des pondérations entre 25% et 50% pour chaque profil (c'est-à-dire : manipulation grossière = tâches ménagères, manipulation précise = travaux d'atelier, et exploration). Par exemple, les bornes de l'*intervalle d'efficacité* de la surface de contact M_2 sont égales à :

$$LB_{M_2} = \min(W_m T_{\%M_2m} + W_h T_{\%M_2h} + W_e T_{\%M_2e}) \quad (5.4)$$

$$UB_{M_2} = \max(W_m T_{\%M_2m} + W_h T_{\%M_2h} + W_e T_{\%M_2e}) \quad (5.5)$$

avec W_m , W_h et W_e les pondérations sur les données des travaux d'atelier, des tâches ménagères et de l'exploration respectivement (chaque pondération variant entre 0,25 et 0,5) et $T_{\%M_2m}$ le pourcentage du temps pendant lequel M_2 est utilisée lors de travaux d'atelier (18,8%), $T_{\%M_2h}$ le temps pendant lequel elle est utilisée lors de tâches ménagères (11,6%) et $T_{\%M_2e}$ sa fréquence d'utilisation pour l'exploration (0%). On obtient :

$$\begin{aligned} LB_{M_2} &= 0,25T_{\%M_2m} + 0,25T_{\%M_2h} + 0,5T_{\%M_2e} \\ &= 0,25 \times 18,8 + 0,25 \times 11,6 + 0,5 \times 0 = 7,6\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} UB_{M_2} &= 0,5T_{\%M_2m} + 0,25T_{\%M_2h} + 0,25T_{\%M_2e} \\ &= 0,5 \times 18,8 + 0,25 \times 11,6 + 0,25 \times 0 = 12,3\% \end{aligned}$$

- l'*intervalle d'efficacité* d'une surface de contact qui en recouvre d'autres est la somme des intervalles de ces surfaces. Par exemple, l'*intervalle d'efficacité* de M_5 est la somme des intervalles d'efficacité des surfaces E_1 , E_2 , M_3 , M_4 et M_5 , c'est-à-dire respectivement et en se référant aux figures 5.2 et 5.4 : $[15,5; 31] + [3,6; 7,2] + [2,2; 3,4] + [4,7; 8,4] + [2,7; 4,6] = [28,7\%; 54,5\%]$ (valeurs approchées).

A partir de ces données, un arbre des interactions manuelles est généré (figure 5.9). Les surfaces de contact canoniques sont d'abord organisées verticalement en fonction du nombre de zones d'interaction simplifiées qui les constituent. Par exemple, la surface de contact M_5 est composée de six zones d'interaction simplifiées (extrémité du pouce, parties gauche et droite de l'index, parties gauche et droite du majeur, annulaire – voir figure 5.6). Elle est ainsi localisée au-dessus des surfaces de contact de la main composées de cinq zones de contact simplifiées ou moins et en dessous de celles à sept zones de contact simplifiées ou plus. Si la paume ou le métacarpe sont impliqués en partie seulement, ils sont comptés pour une demi-zone de contact simplifiée (c'est le cas de M_{11} par exemple).

On note que les interactions manuelles ne sont pas limitées aux vingt-quatre surfaces types des figures 5.2 et 5.4. Elles peuvent également mettre en jeu n'importe quelle autre surface de la main. Ainsi l'*intervalle d'efficacité* peut aussi être calculé pour certaines de leurs combinaisons. De façon à contenir la complexité des résultats, seules les combinaisons qui accroissent significativement leur *intervalle d'efficacité* sont retenues. Ces surfaces combinées sont dénommées en fonction de leurs zones élémentaires constitutives (par exemple : M_3 & M_2).

Dans un second temps, ces zones sont reliées les unes aux autres en considérant que deux surfaces sont connectées si celle qui est au-dessus recouvre celle qui est en dessous. Des connexions multiples apparaissent si une surface donnée fait partie de plusieurs autres. Cependant, les connexions redondantes sont évitées : par exemple, M_{17} inclut E_2 mais aucune connexion ne les relie directement car E_2 est déjà prise en compte par l'intermédiaire de M_5 et M_6 .

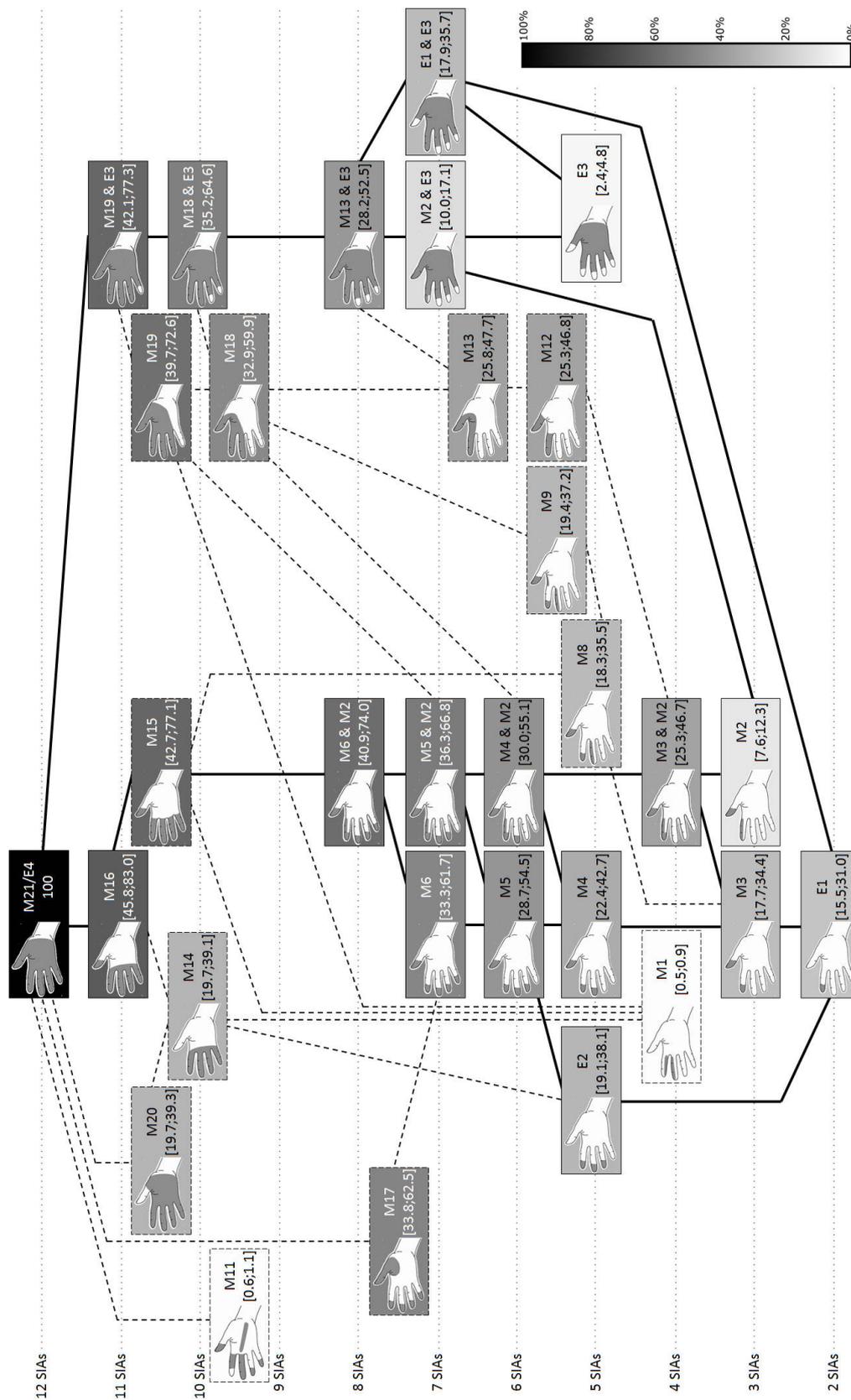


FIGURE 5.9: Arbre d'interaction général des surfaces de contact et de leurs combinaisons en fonction du nombre des zones d'interaction simplifiées les constituant et du temps (pourcentages et niveaux de gris) pendant lequel elles permettent une interaction naturelle avec l'environnement. SIA : zone d'interaction simplifiée.

Certaines surfaces de contact sont rarement utilisées, et sont donc considérées comme moins intéressantes car elles donnent accès à un nombre très faible d'interactions supplémentaires tout en étant composées de plus de zones d'interaction simplifiées (M_8 compte par exemple cinq zones d'interaction simplifiées et permet d'interagir naturellement avec l'environnement 18.3% à 35.5% du temps, c'est-à-dire seulement 0.6% à 1.1% de plus que M_3 au prix de deux zones d'interaction simplifiées supplémentaires). Elles sont affichées avec des liens en pointillés.

Cet arbre illustre de manière synthétique l'efficacité des diverses surfaces de contact de la main, c'est à dire la capacité qu'elles offrent d'interagir de façon naturelle avec les mains, en fonction de la complexité de la surface manuelle mise en jeu, évaluée à l'aide du nombre de zones élémentaire dont elle est constituée. Cet arbre constitue un outil graphique d'aide au choix des zones d'interactions à considérer dans la conception d'une interface haptique par exemple.

Un chemin critique (composé des phalanges distales et de la surface externe de l'index) apparaît, qui distingue, en fonction du nombre de zones d'interaction simplifiées, les surfaces à prendre en compte pour garantir l'accès aux prises les plus utilisées au cours du temps. On remarque que les intervalles d'utilisation des surfaces de contact appartenant à ce chemin critique sont proches de ceux des zones communément adressées par les interfaces dextres. Pour un nombre de zones d'interaction simplifiées donné, le fait de privilégier une surface de contact plutôt qu'une autre peut donc dépendre des spécificités de l'activité effectuée et de son influence sur les fréquences d'utilisation des diverses surfaces de contact. La surface latérale externe de l'index est une fois encore mise en avant par le fait qu'elle offre une alternative intéressante à la seule considération des extrémités des doigts.

Il est aussi possible de déterminer indirectement la quantité d'interactions dont l'accès est rendu possible par les diverses parties de la main en examinant les handicaps causés par une amputation. En effet, l'amputation d'une partie de la main aboutit à ce que toute prise qui lui soit associée ne puisse plus être réalisée. La section suivante compare l'arbre d'interaction avec un arbre représentant la perte de fonctionnalité de la main relative à une amputation.

5.3.2 Amputations de la main

Les méthodes d'évaluation mises au point par (SWANSON 1964) permettent de calculer une image des pourcentages de perte de fonctionnalité de la main en fonction des phalanges amputées. Elles montrent à quel point les zones amputées sont utiles, et elles reflètent ainsi les *index d'efficacité* de l'arbre d'interaction que nous avons établi.

En ce sens, la figure 5.10 place l'arbre des capacités d'interaction (gauche) en perspective de son équivalent en termes incapacités consécutives à une amputation, élaborée à partir de données provenant de (JONES 1997) et (SWANSON 1964) (droite). Cet arbre rend compte des inclusions

des zones amputées à travers les liens entre les mains amputées correspondantes. On remarque que certaines des surfaces de la peau n'incluent pas les extrémités des doigts (par exemple E_3 et les suivantes) et n'ont donc pas de zones amputées équivalentes car considérer qu'elles pourraient rester isolées du reste de la main n'aurait pas de sens. Ces surfaces ne sont pas prises en compte, de même que celles qui sont très spécifiques (M_1 , M_{11} par exemple). De plus, certaines surfaces de contact correspondent aux mêmes zones amputées (M_2 et suivantes par exemple) et ne peuvent pas être distinguées dans l'arbre d'amputation. D'autres ne diffèrent que par la surface de la paume considérée (M_8 et M_9 , M_{12} et M_{13} , M_{14} et M_{20} , M_{15} et M_{16}). De telles surfaces sont similaires en regard des handicaps qu'elles causent car la paume n'est pas prise en compte dans la grille. Elles sont donc groupées dans la même main amputée. Les zones amputées sont organisées verticalement en fonction du nombre de phalanges manquantes, ce qui donne un aperçu de la complexité de la surface de la main perdue. On note que les échelles verticales des deux arbres diffèrent l'une de l'autre.

Une observation des deux arbres démontre une bonne corrélation des capacités d'interaction offertes par une surface de la main et des incapacités induites par sa perte. L'analyse plus fine présentée sur la figure 5.11 le confirme, bien que l'on voie apparaître certaines exceptions : tout d'abord, la phalange distale de l'index a un impact plus faible du point de vue de l'amputation, d'où une décorrélation sur (E_1). Cela est probablement dû à la grande influence de l'extrémité de l'index pour les procédures exploratoires (particulièrement pour le suivi de contour). Il est moins critique pour les handicaps, car la même fonction peut être réalisée à l'aide d'un autre doigt. Ensuite, le pouce a une plus grande importance d'après l'échelle du handicap. Son influence se propage à travers (M_8/M_9), (M_{12}/M_{13}), (M_{18}) et (M_{19}). Finalement, la perte de tous les doigts induit une différence au niveau de (M_{14}/M_{20}). Cette décorrélation peut être due à l'adaptation de l'amputé : le pouce seul peut être plus facilement utilisé que tout autre doigt pour attraper un objet entre le pouce et la paume.

L'examen des handicaps de la main correspond aux résultats obtenus avec l'approche ergonomique en ceci que le pouce est le plus utilisé, ensuite les extrémités de l'index et du majeur, finalement les extrémités de l'annulaire et de l'auriculaire.

5.4 Application à l'évaluation des capacités des interfaces haptiques

La définition des spécifications pour le choix ou la construction d'une interface haptique générique en regard d'un panel de tâches à simuler peut être ardu (SAMUR 2012). Comme nous allons le montrer ci-dessous, l'utilisation de l'arbre construit précédemment peut constituer un outil supplémentaire d'aide à la rédaction de ces spécifications.

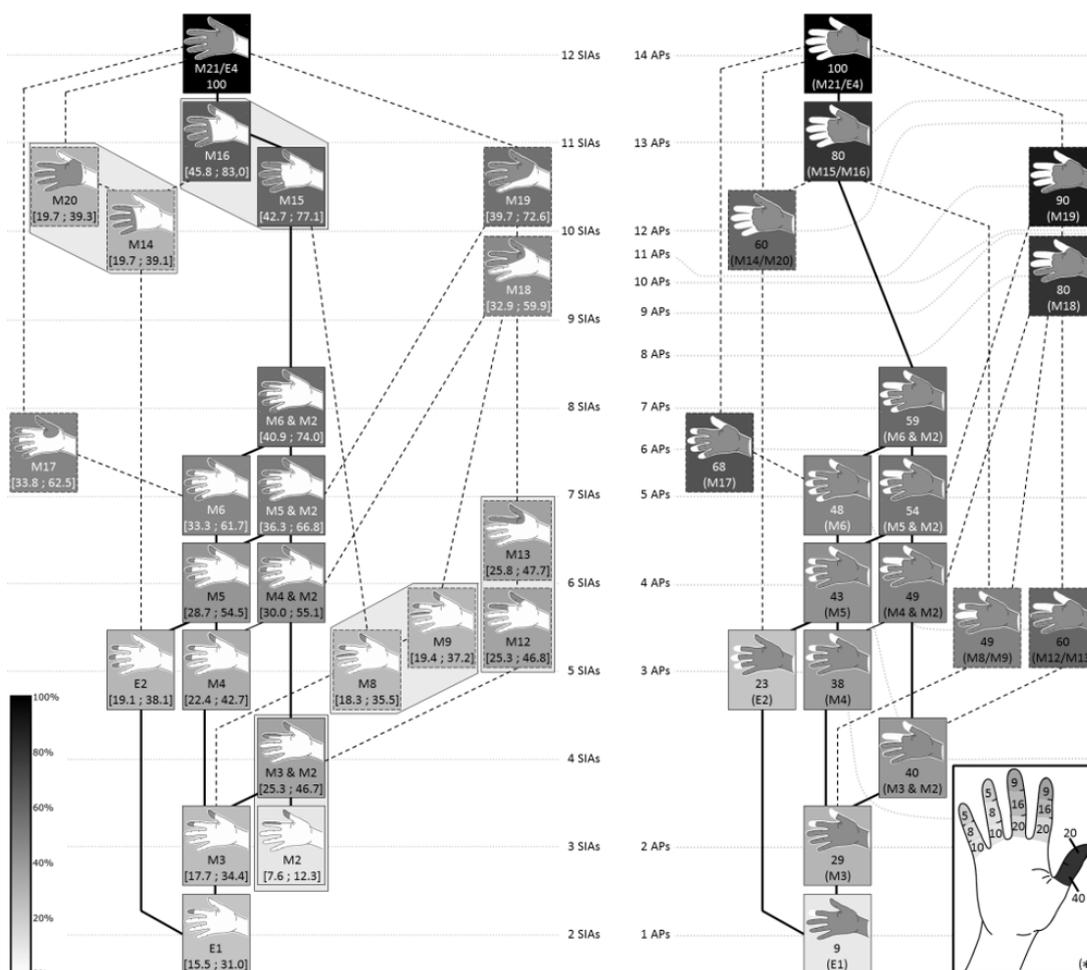


FIGURE 5.10: Une comparaison de l'arbre d'interaction (gauche) avec un arbre d'amputation (droite, compilation de la carte de notation du handicap *) (JONES 1997 ; SWANSON 1964). Les zones amputées sont en blanc : les chiffres et niveaux de gris représentent les pourcentages de perte de fonctionnalité de la main dans le cas d'une amputation à l'articulation correspondante. Par exemple, une amputation de l'extrémité de l'annulaire résulterait en une perte de fonctionnalité de la main de 5%, tandis qu'une amputation de la totalité du pouce est associée à une perte de fonctionnalité de 40%. SIA : zones d'interaction simplifiées. AP : phalanges amputées.

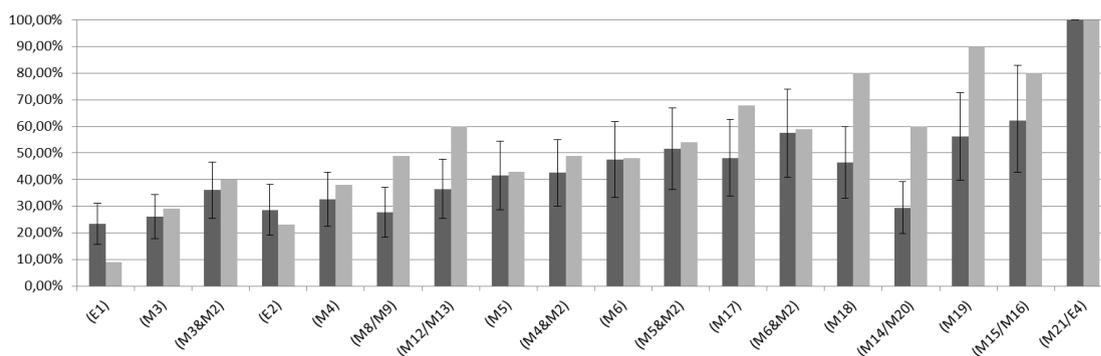


FIGURE 5.11: Corrélations avec les amputations (pourcentages). Gris sombre : zones de contact avec indicateurs mini et maxi ; gris clair : amputations.

5.4.1 Critères de performance des interfaces haptiques

L'interface haptique générique parfaite doit pouvoir simuler efficacement toute interaction entre un opérateur et un environnement virtuel ou distant. Cela impliquerait que l'interface puisse rendre un contact à géométrie variable sur toute la surface de la main tout en fournissant à l'utilisateur un retour d'effort en accord avec les limites de perception et d'action humaines, des bandes passantes similaires et un espace de travail identique. Dans la pratique, cela n'est pas possible en l'état actuel de la technique et les interfaces haptiques dextres existantes ont des performances limitées qui ne leur permettent de répondre à des performances attendues que dans un cadre de simulation restreint (TRANNOY, LOZADA et MÉGARD 2008). Dans ces conditions, et en nous intéressant plus spécifiquement à la simulation de tâches de manipulation fine, on définit les critères suivants, qui peuvent être utilisés pour évaluer les interfaces haptiques dextres :

- L'*index d'efficacité maximale (théorique)* (EI_{max}) est défini comme le pourcentage du temps pendant lequel les surfaces de la main en contact avec les effecteurs de l'interface permettent d'interagir naturellement avec l'environnement. Il constitue une mesure de la capacité de l'interface à simuler efficacement le comportement de tout objet virtuel. Il est calculé ici comme la moyenne des efficacités des zones de contact de l'arbre d'interaction général prises en compte par l'interface.
- L'*index de degrés de liberté pilotés* (I_{DOF}) est le ratio entre le nombre de degrés de liberté avec retour d'effort de l'interface par zone de contact simplifiée et de ceux requis pour interagir naturellement avec l'environnement. Il est d'abord calculé pour chaque couple constitué d'un des effecteurs de l'interface et de la zone de contact simplifiée correspondante. Ensuite un indice I_{DOF} global est obtenu en moyennant ces valeurs. Comme le poids d'un objet ou l'utilisation d'un outil génère des efforts tangentiels à la surface de la peau, on fait l'hypothèse que l'application de trois forces (une normale et deux tangentielles) sur l'extrémité d'un doigt est nécessaire pour un bon rendu des efforts. Sur la paume, l'affichage de trois forces et trois couples est nécessaire. On remarque que les degrés de liberté peuvent être pondérés : comme la manipulation prédomine dans ce chapitre, les efforts normaux sont affectés d'un poids de 50%, et 25% pour les directions tangentielles.
- L'*index d'espace de travail* (I_{WS}) est calculé comme la moyenne du pourcentage de l'espace de travail de chaque partie de la main qui peut être parcouru par chaque effecteur de l'interface. Pour les systèmes portables qui peuvent suivre librement les mouvements des mains, seuls les mouvements des extrémités des doigts par rapport à la paume sont pris en compte. Au contraire, pour les systèmes à base fixe qui limitent globalement les mouvements de la main, on prend en compte et on combine à la fois les espaces de travail des doigts et de la main. Pour la majorité des interfaces, le pourcentage de l'espace de travail des doigts décrit par l'interface peut être facilement extrait de la littérature. De telles informations n'existent

pas pour le bras. On se réfère donc aux standards ergonomiques. Un score de 100% est attribué à une interface si elle peut être déplacée dans tout l'espace de travail du bras, 75% si elle peut atteindre un volume jugé acceptable d'environ 1500x500x500 mm situé devant l'utilisateur, 50% si elle peut décrire un volume jugé confortable (1100x300x300 mm) et 25% si la main peut à peine bouger (NF X 35-104 1983).

- L'*index de capacité en effort* (I_F) est défini comme le ratio entre la capacité maximale en effort de l'interface et l'effort requis pour simuler efficacement les contacts avec des objets virtuels. La majorité des interfaces haptiques dextres ont les mêmes capacités en effort pour toutes les zones de contact et dans toutes les directions. Si ce n'est pas le cas, une valeur moyenne est calculée. On note que la force nécessaire diffère selon les utilisateurs et dépend du type de prise, de la configuration du bras et de la direction de la force (DAAMS 1994). Les forces maximales s'étendent d'environ 50 N à plus de 120 N pour des prises de précision, et de moins de 150 N à plus de 500 N pour des prises de puissance. En pratique cependant, considérer 40 N pour la paume et 10 N pour les doigts comme le pic d'effort maximal atteignable semble raisonnable. En effet, ces valeurs permettent de réaliser jusqu'à 90% des activités de tous les jours (JONES 1997). De plus, les efforts les plus importants ne peuvent pas être appliqués pendant une longue période de temps (DAAMS 1994).
- L'*index de raideur* (I_K) est le ratio entre la raideur maximale de l'interface et celle nécessaire au rendu réaliste du comportement des objets rigides. On choisit ici d'assimiler celle-ci à sa raideur apparente. Une raideur de 24200 N/m est théoriquement nécessaire à la simulation d'un mur dur via l'utilisation de retour haptique uniquement (TAN et al. 1994), mais combiné à un retour visuel, une illusion convaincante de dureté peut être obtenue à environ 5000 N/m. Cette dernière valeur est ici utilisée comme référence.

Finalement, un index d'efficacité global peut être calculé en multipliant tous ces critères entre eux, de façon à attribuer une note à chaque interface rendant compte de son efficacité en regard d'un panel de tâches à simuler.

5.4.2 Revue de quelques interfaces haptiques dextres

Dans ce paragraphe, quelques interfaces haptiques génériques reprises de l'état de l'art du chapitre 2 sont évaluées à la lumière des critères détaillés précédemment. Pour chaque interface, un diagramme radar représente la valeur de chaque critère utilisé dans le calcul de l'efficacité d'interaction globale, qui est affichée en dessous en niveau de gris (figure 5.12) :

- (a) l'interface PERCRO PHFE est une interface permettant d'interagir avec les extrémités du pouce et de l'index (FRISOLI et al. 2007). La zone de contact qui lui correspond est donc M_3 (donc $EI_{max} = 26,1\%$). Elle est composée de deux robots à six degrés de liberté dont trois sont motorisés. Cela permet un retour d'effort suivant trois degrés de liberté à l'extrémité de chaque doigt, d'où $I_{DOF} = 100\%$. Les deux robots sont chacun attachés à une base

portée sur l'avant-bras qui peut donc se déplacer librement. Chaque robot décrit la totalité de l'espace de travail du doigt auquel il est attaché. Cependant, les extrémités des doigts sont attachés aux effecteurs par des systèmes relativement encombrants qui les empêchent d'être rapprochés l'un de l'autre. Cette limite est prise en compte en diminuant l'index d'espace de travail à $I_{WS} = 90\%$. Sa capacité en effort est supérieure à 4 N en continu et 25 N en crête, et sa raideur est supérieure à 5900 N/m. Ces valeurs sont supérieures à celles requises ($I_F = I_K = 100\%$). Ainsi, l'efficacité d'interaction de cette interface est égale à 23,5%.

- (b) Le gant IHS10 (GOSSELIN 2012) est un système lié aux extrémités de trois doigts donnant ainsi accès aux interactions impliquant M_4 ($EI_{max} = 32,6\%$). Il est composé de trois robots à cinq degrés de liberté et trois moteurs chacun, permettant de piloter trois degrés de liberté par doigt ($I_{DOF} = 100\%$). De même que pour le PHFE, son espace de travail correspond à celui des doigts mais les systèmes d'attache les empêchent de mettre les doigts en contact les uns des autres, donc I_{WS} est évalué à 90%. Sa capacité en effort crête et sa raideur apparente sont supérieures à 10 N et 5000 N/m respectivement, donc $I_F = I_K = 100\%$. Son efficacité d'interaction égale 29,3%.
- (c) le Rutgers Master II (BOUZIT et al. 2002) est une interface haptique à quatre doigts permettant d'interagir à travers les surfaces de contact M_5 ($EI_{max} = 41,6\%$). Le retour d'effort est fourni par des pistons à air comprimé logés au niveau de la paume. Il n'est disponible que selon la normale aux surfaces de contact. Cela correspond à $I_{DOF} = 50\%$. Par ailleurs, cette technologie limite la fermeture de la main à 55% des mouvements de manipulation naturels car les pistons ont une taille minimale approchant la moitié de leur taille maximale, ainsi $I_{WS} = 55\%$. L'effort maximum applicable est supérieur à 16 N et la raideur apparente approche les 8000 N/m, donc $I_F = I_K = 100\%$. Dans l'ensemble, l'efficacité d'interaction de ce système est 11,4%.
- (d) Le Cybergrasp est un gant haptique dextre à cinq doigts. Sa structure mécanique est un semi-exosquelette permettant un retour d'effort couplé sur les phalanges médianes et distales des doigts. On considère donc qu'il s'agit d'une interface focalisée sur les extrémités des doigts donnant accès aux interactions correspondant à M_6 ($EI_{max} = 47,5\%$). I_{DOF} est limité à 50% car ses moteurs ne permettent une interaction que selon la normale aux extrémités des doigts. Les doigts peuvent bouger librement (on a donc $I_{WS} = 100\%$), grâce à une connexion relativement légère avec leurs extrémités. Sa capacité en effort égale 12 N et sa raideur de commande peut être ajustée à 50000 N/m (AIPLE et SCHIELE 2013), donc $I_F = I_K = 100\%$. On obtient finalement une efficacité d'interaction de 23,8%.
- On pourrait argumenter que ce système ne correspond pas vraiment à une interface adaptée aux extrémités des doigts uniquement puisqu'elle permet des interactions avec les phalanges médianes, c'est-à-dire une combinaison de M_{15} et M_{12} . Cela augmenterait grandement EI_{max} . Cependant, dans ce cas, il serait juste de considérer que I_{DOF} est divisé par

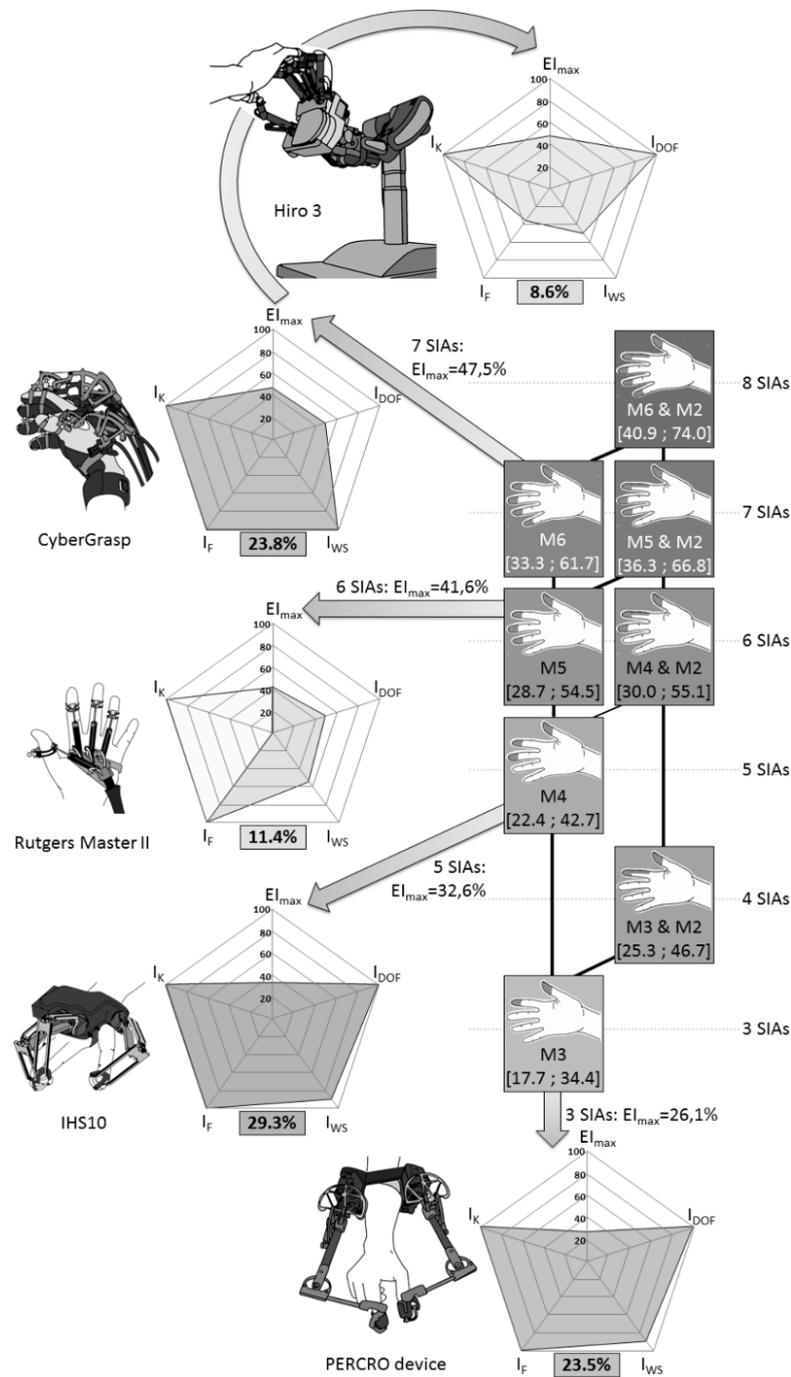


FIGURE 5.12: Démonstration de l'utilisation des zones d'interaction pour le classement d'interfaces haptiques existantes (toutes valeurs en pourcentages). EI_{max} : index d'efficacité maximale ; I_{DOF} : index de degrés de liberté pilotés ; I_{WS} : index d'espace de travail ; I_F : index de capacité en effort ; I_K : index de raideur. les nombres en niveaux de gris sous les diagrammes radar sont les index d'efficacité globaux qui en résultent.

deux car le retour d'effort est couplé entre les phalanges médianes et distales. Finalement, l'efficacité d'interaction obtenue serait similaire, sinon inférieure.

- (e) Le bras HIRO III (ENDO et al. 2011 ; HIRO III 2011) est une interface haptique à cinq doigts de type opposé permettant une interaction à travers les surfaces M_6 ($EI_{max} = 47.5\%$). Il permet un retour d'effort selon trois degrés de liberté pour chaque extrémité de doigt ($I_{DOF} = 100\%$). Contrairement aux interfaces précédentes, il s'agit d'un robot à base fixe. En conséquence, même s'il peut décrire l'espace de travail des doigts, les mouvements de la main sont limités à un demi-tore dont les dimensions maximales avoisinent $740 \times 370 \times 370$ mm, approchant le volume de travail confortable de la main, donc $I_{WS} = 100\% \times 50\% = 50\%$. Sa capacité en effort est de seulement 3,6 N aux extrémités des doigts tandis que sa raideur maximale de commande excède 5000 N/m. Ainsi $I_F = 36\%$ tandis que $I_K = 100\%$. D'où une efficacité d'interaction de seulement 8,6%.

La figure 5.13 résume ces résultats. Elle indique les efficacités d'interaction des interfaces et les index d'efficacité maximaux des zones d'interaction associées en fonction du nombre de zones d'interaction simplifiées auxquelles elles sont attachées. Elle met en lumière le fait que des interfaces relativement simples comme le gant IHS10 peuvent être plus efficaces que des interfaces plus complexes comme le CyberGrasp ou le bras Hiro III, du point de vue des interactions auxquelles elles donnent accès.

Ces résultats sont probablement optimistes cependant. En effet, des critères de performances supplémentaires pourraient être pris en compte, comme le frottement ou l'encombrement, et viendraient diminuer d'autant les performances globales. L'influence de ce dernier peut aussi dépendre de l'infrastructure de réalité virtuelle mise en place (cette influence est par exemple nulle dans le cas de l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle) : elle n'a donc pas été prise en compte ici. Pour autant, les dessins des interfaces de la figure 5.12 sont réalisés à la même échelle, afin de fournir un aperçu de leur encombrement.

5.4.3 Préconisations pour la conception des interfaces haptiques

Les évaluations du paragraphe précédent sont valables dans un cadre général. Elles s'appliquent donc à des systèmes conçus pour simuler efficacement tout type d'interaction. Pour de telles conceptions génériques, nous pouvons déduire de l'observation de la figure 5.12 que de nouvelles cinématiques permettant de suivre et d'appliquer un retour d'effort sur les cinq doigts et la surface latérale de l'index (M_6 et M_2) aboutiraient à des conceptions plus efficaces. En effet, de telles structures permettraient de simuler les interactions naturelles utilisées pendant presque 60% du temps dans un environnement virtuel (en considérant la moyenne des valeurs extrêmes fournies dans l'arbre d'interaction comme EI_{max}).

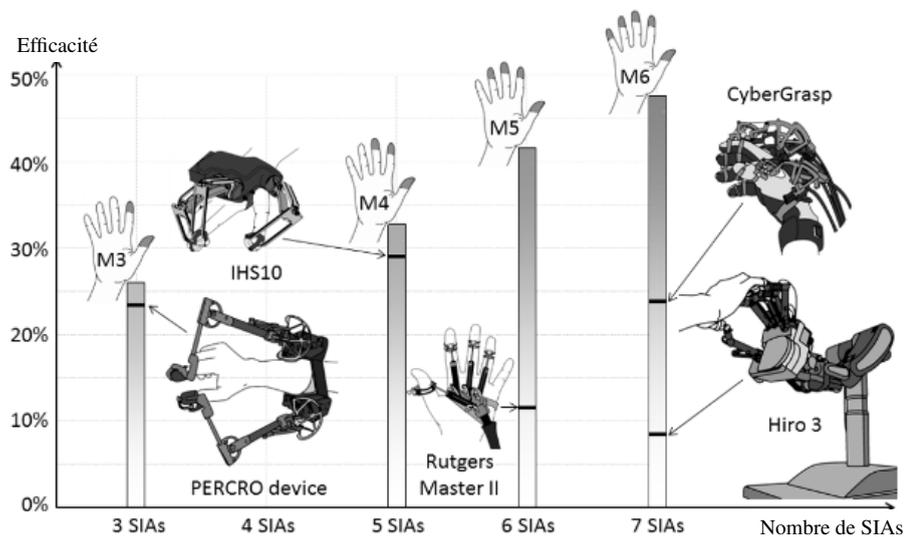


FIGURE 5.13: Efficacités d'interaction d'interfaces haptiques existantes (tirets noirs, pourcentages) et index d'efficacité maximale des zones d'interactions associées (barres, pourcentages) en fonction du nombre de zones d'interaction simplifiées mises en jeu). SIAs : zones d'interaction simplifiées.

On peut également être intéressé par le développement d'une interface adaptée à un panel de tâches particulier. Afin d'aider à la résolution de ce problème, la figure 5.14 regroupe des arbres d'interaction spécifiques correspondant aux trois situations présentées dans le paragraphe 5.2, avec les fréquences d'utilisation affichées sous forme de chiffres et de niveau de gris. Comme détaillé plus haut, leur combinaison avec des pondérations appropriées donne accès à tout panel de tâches compris entre les manipulations fines, les manipulations grossières et l'exploration.

Cependant, on remarque que ces arbres stéréotypés présentent un intérêt par eux-mêmes, car ils peuvent correspondre à la conception d'interfaces haptiques spécifiques. Par exemple :

- L'arbre d'interaction des travaux d'atelier, dont les interactions sont principalement des tâches de manipulation fine, est bien adapté pour guider la conception d'une interface haptique dédiée à la simulation de tâches fines d'assemblage. Il présente un chemin critique légèrement différent de celui de la figure 5.9 en faisant ressortir encore plus la surface latérale de l'index. Cela suggère le développement d'une interface haptique focalisée sur cette zone et sur les cinq doigts de la main, car cela permettrait d'avoir accès à plus de 50% des interactions correspondantes.
- L'arbre d'interaction de des tâches ménagères est représentatif de tâches de manipulations grossières. Dans ce cas le chemin critique est similaire à celui de la figure 5.9. Cependant, la prise en compte de tous les doigts ne permet pas une interaction naturelle pendant plus de 40% du temps, tandis que l'ajout de la paume augmente ce chiffre de manière drastique. Cela suggère qu'un système équipé d'une poignée serait bien adapté à la simulation de telles tâches, bien qu'il ne permette pas de suivre et d'appliquer un retour d'effort sur chaque doigt séparément.
- Finalement, le chemin critique est différent dans le cas de tâches exploratoires pures. L'utilisation de l'extrémité de l'index donne accès à la majorité des procédures exploratoires. Un système tactile adapté à cette zone seule peut donc être considéré comme suffisant pour des tâches d'exploration pure. Bien que plus complexe, un retour d'effort sur l'index, le majeur et l'annulaire apparaît comme un plus dans ce cas.

5.5 Conclusions

Ce chapitre développe les méthodes utilisées pour construire des outils graphiques d'aide à la conception des interfaces haptiques dextres. Les outils proposés consistent en une carte d'interaction et un arbre d'interaction.

Trois cartes d'interaction différentes ont été élaborées : une pour les tâches d'exploration et deux pour la manipulation fine et grossière. Une carte générale pondérée a ensuite été construite à partir d'une combinaison de ces trois cartes. Elle reflète l'importance relative des diverses zones de la main impliquées dans des tâches de manipulation générales, c'est-à-dire incluant des tâches de manipulation fine et grossière ainsi que des tâches d'exploration. Elle met en lumière l'importance des extrémités des doigts dans les interactions manuelles. Les phalanges distales du pouce et de l'index sont les plus utilisées, viennent ensuite celle du majeur, puis finalement celles de l'annulaire et de l'auriculaire. La surface latérale de l'index et l'extrémité de l'annulaire sont utilisées avec la même fréquence : cette particularité pourrait initier un intérêt croissant pour la conception d'interfaces prenant cette surface latérale en compte plutôt que l'annulaire, car

elle permet d'augmenter l'efficacité au prix d'une complexification minimale de l'ensemble. Les autres zones des doigts et la paume sont moins utilisées.

Un arbre d'interaction est ensuite construit pour faciliter le choix des zones de contact de la main qu'une interface haptique dextre doit adresser pour accroître l'immersion d'un opérateur dans un monde virtuel ou distant sans rendre sa conception trop complexe. Pour en illustrer l'intérêt, une évaluation de plusieurs interfaces existantes est proposée en prenant en compte l'efficacité d'interaction. L'arbre est aussi utilisé pour proposer des préconisations pour la conception d'interfaces haptiques avec un bon ratio entre les capacités d'interaction et la complexité, en considérant à la fois des interactions génériques et spécifiques.

Les deux résultats principaux, c'est-à-dire les zones de la main les plus utilisées et les capacités d'interaction en fonction des zones de la main mises en jeu, sont corrélés aux autres recherches sur le sujet disponibles dans la littérature. Tout d'abord, il apparaît que les zones de contact de la main les plus utilisées sont aussi celles qui présentent la densité de mécanorécepteurs la plus élevée. Ensuite, l'arbre d'interaction illustrant l'efficacité d'interaction en fonction du nombre de zones de la main utilisées est corrélé à la décroissance de la capacité d'interaction induite par l'amputation des phalanges.

L'analyse présentée dans ce chapitre pourrait être améliorée en considérant un plus grand panel d'interactions manuelles, sachant que les méthodes présentées ci-dessus sont suffisamment génériques pour être appliquées à toute nouvelle base de données. Par exemple, l'enregistrement de données supplémentaires permettrait de mieux mettre en lumière le rôle de la paume pour la stabilisation du geste lors de tâches de manipulation fine, étant donné que les mouvements précis (par exemple l'assemblage d'objets miniatures) peut nécessiter que la partie proximale de la paume repose contre une surface stable tandis que les doigts effectuent la tâche. La prise en compte d'interactions bimanuelles pourrait également présenter un intérêt pour mieux comprendre la façon dont la main est utilisée.

Les travaux présentés ici ont pour but d'aider à la conception d'interface haptiques dextres efficaces et simplifiées à travers l'analyse des zones de contact de la main les plus utilisées. Ils sont complémentaires des travaux de (BULLOCK et al. 2013) où les auteurs ont analysé les types de prises les plus fréquemment utilisés pour aider à réduire la complexité des prothèses et mains robotiques. Ces deux études pourraient être approfondies en considérant les résultats de (DAAMS 1994 ; SANTELLO, FLANDERS et SOECHTING 1998) où les forces de préhension et les synergies de la main sont étudiées.

Chapitre 6

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons pour l'essentiel décrit la mise en œuvre d'une interface haptique plane à contacts intermittents. Plusieurs aspects ont été abordés pour aboutir à cette réalisation.

Dans un premier volet, nous avons décrit la conception d'un effecteur pour le contact intermittent, adapté pour le suivi plan du mouvement d'un doigt par rapport à la paume. La composition mécanique et électronique de cet effecteur a été détaillée. Plusieurs méthodes de calibration ont été également proposées en fonction du niveau de précision requis. L'utilisation de cette instrumentation dans le contexte du suivi du mouvement du doigt a été également étayée. Une modélisation du mouvement du doigt et de sa géométrie a notamment permis d'accroître la précision. Nous avons montré que le nombre de mesures pouvait être diminué sans perte inconsiderée de performances. Cela présente de l'intérêt pour une utilisation dans le cadre des interfaces dextres, où l'encombrement doit être réduit. Nous avons donc présenté des perspectives pour la conception d'un effecteur permettant de suivre le doigt d'un utilisateur dans toutes les directions de l'espace.

Dans le deuxième volet de ce travail, nous avons équipé une interface haptique plane à deux degrés de liberté de l'effecteur que nous avons conçu. Nous avons considéré une tâche simple de réalité virtuelle afin de disposer d'un environnement de développement pour le contrôle de l'interface à contacts intermittents. Les deux principaux modes de commande ont été analysés séparément : d'une part le suivi de position en espace libre, d'autre part la restitution d'effort au contact. Nous avons ensuite étudié la transition entre ces deux modes. La loi de commande issue de la littérature a été évaluée expérimentalement. Nous avons mis en lumière ses défauts, qui dégradent la qualité de l'interaction au moment du passage de l'espace libre au contact lorsque la géométrie du doigt est estimée avec une erreur, même faible. Nous avons alors modifié cette loi afin de pallier les défauts observés. La loi de commande finale est indépendante du rayon du doigt : elle garantit une restitution réaliste du contact. Afin de valider l'approche choisie, nous avons comparé les performances de dix utilisateurs réalisant une tâche de détection de contact,

d'une part en utilisant l'interface à contacts intermittents et d'autre part en utilisant une interface haptique classique. Les résultats obtenus montrent que les utilisateurs détectent le contact plus rapidement, en appuyant moins fort et en réalisant la tâche à des vitesses plus élevées avec l'interface à contacts intermittents. Cette expérimentation constitue un premier élément permettant de valider l'intérêt du contact intermittent pour la simulation en environnement virtuel.

Finalement, nous avons initié l'extension des résultats obtenus pour un doigt en nous intéressant aux zones de contact de la main à considérer dans la conception d'une interface haptique dextre. Nous avons d'abord analysé les taxonomies pour la manipulation et l'exploration et en avons extrait les zones de contact utilisées en fonction de la prise considérée. Ces données ont été combinées avec les fréquences d'utilisation de ces zones, issues d'enregistrements des activités quotidiennes de deux travailleurs différents et de données sur la durée des mouvements exploratoires. Nous avons élaboré des cartes d'interaction de la main, qui rendent compte de la fréquence avec laquelle les zones de la main sont utilisées pour un ensemble de tâches donné. Ces données ont été combinées pour construire un arbre d'interaction, qui rend compte de l'efficacité d'interaction en fonction des zones de la main prises en compte dans une conception. Ces résultats ont été corrélés aux autres recherches sur le sujet disponibles dans la littérature. D'une part, les zones de la main les plus utilisées d'une manière générale sont également celles ayant la densité de mécanorécepteurs la plus élevée. D'autre part, l'arbre d'interaction correspond à la perte de fonctionnalité de la main induite par une amputation des phalanges. Enfin, l'arbre d'interaction nous a permis d'élaborer un critère d'évaluation qui, utilisé avec d'autres, permet de mieux rendre compte des capacités des interfaces haptiques existantes et des performances à privilégier pour la conception d'une nouvelle interface.

Nos travaux ouvrent différentes perspectives.

Perspectives à court terme

Tout d'abord, une nouvelle itération dans le dimensionnement de l'anneau permettrait d'une part de réduire l'encombrement en diminuant le nombre de capteurs impliqués dans sa conception, d'autre part d'augmenter la vitesse maximale de suivi de l'interface sans remettre en cause le dimensionnement de ses actionneurs et de sa structure mécanique.

L'électronique de l'effecteur annulaire élaboré au chapitre 3 pourrait être remise en question pour réduire le temps de communication entre la carte d'acquisition et le contrôleur. Cela pourrait permettre de réduire le retard existant entre la mesure capteur et sa transmission au contrôleur.

L'apparition sur le marché de capteurs miniatures basés sur une mesure de temps de vol pourrait permettre de réduire la sensibilité à la réflectivité de la peau. En outre, le filtrage des mesures pourrait être amélioré pour atténuer le niveau de bruit sur la position du centre du doigt.

Enfin, la loi de commande en suivi de position pourrait être améliorée en prenant en compte une prédiction des mouvements de l'utilisateur.

Perspectives à long terme

Tout d'abord, les analyses effectuées sur les zones de contact de la main montrent que la partie latérale externe de l'index est aussi utilisée que la phalange distale de l'annulaire. Une interface haptique à contacts intermittents prenant cette zone de contact en compte permettrait d'accroître son efficacité.

En outre, l'interface élaborée est bidimensionnelle. Les résultats obtenus permettent d'affirmer qu'il est possible de concevoir une interface capable de suivre les mouvements d'un doigt dans l'espace, avec un encombrement suffisamment faible pour permettre une interaction à plusieurs doigts.

Dans le cas d'une interface haptique à contacts intermittents capable de suivre les mouvements dans plusieurs directions de l'espace et dont l'espace de travail correspondrait à celui du bras, la sécurité doit être renforcée par un système externe. En effet, les moteurs restent alimentés pendant toute la simulation et notamment en espace libre.

Enfin, les analyses et résultats proposés dans le cadre de cette thèse s'appliquent au mouvement d'un doigt par rapport à la paume et ne prennent en compte aucun marqueur. Cependant, il est envisageable de les transposer à une utilisation avec une poignée instrumentée. Une telle solution permettrait d'en reconstruire la position plus finement, et ainsi augmenter les performances en suivi de l'interface. Cela pourrait permettre une restitution plus réaliste de l'environnement, par exemple dans le contexte de la chirurgie dentaire.

Bibliographie

- ACHHAMMER, A. et al. (2010). « Improvement of model-mediated teleoperation using a new hybrid environment estimation technique ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 5358–5362.
- ADAMS, R.J. et B. HANNAFORD (1998). « A two-port framework for the design of unconditionally stable haptic interfaces ». In : *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 1254–1259.
- (1999). « Stable haptic interaction with virtual environments ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15.3, p. 465–474.
- AHN, S.J., W. RAUH et H.J. WARNECKE (2001). « Least-squares orthogonal distances fitting of circle, sphere, ellipse, hyperbola, and parabola ». In : *Elsevier Pattern Recognition* 34, p. 2283–2303.
- AIPLE, M. et A. SCHIELE (2013). « Pushing the limits of the CyberGrasp™ for haptic rendering ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3541–3546.
- AKENINE-MÖLLER, T., E. HAINES et N. HOFFMAN (2008). « Advanced Shading ». In : *Real-Time Rendering, Third Edition, Chapter 7*. Taylor & Francis, p. 201–284.
- BAKER, N.A. et al. (2007). « Kinematics of the fingers and hands during computer keyboard use ». In : *Journal of Clinical Biomechanics* 22.1, p. 34–43.
- BAXTER, D.P. (2013). *Proximity sensor having an array of single photon avalanche diodes and circuitry for switching off illumination source and associated method, computer readable medium and firmware*. U.S. Patent 8,610,043 B2.
- BELLOT, D. et N. MECHBAL (2010). *Estimation pour la robotique – Partie II*. Cours MSc Systèmes Avancés et Robotique. Arts et Métiers Paristech.
- BERGAMASCO, M., A. FRISOLI et F. BARBAGLI (2002). « Haptics Technologies and cultural heritage applications ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Animation*, p. 25–32.
- BERTSEKAS, D.P. (1999). *Nonlinear Programming*. 2nd. Athena Scientific, Cambridge, MA.
- BLAIS, F. (2004). « Review of 20 years of range sensor development ». In : *Journal of Electronic Imaging* 13.1, p. 231–240.

- BORDEGONI, M. et al. (2010). « A force and touch sensitive self-deformable haptic strip for exploration and deformation of digital surfaces ». In : *Proceedings of the Eurohaptics Conference – Part II*, p. 65–72.
- BOUZIT, M. et al. (2002). « The Rutgers Master 2 – new design force-feedback glove ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 7.2, p. 256–263.
- BROOKS, T.L. (1990). « Telerobotic response requirements ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, p. 113–120.
- BUERGER, S.P. (2005). « Stable, High-force, Low-impedance Robotic Actuators for Human-Interactive Machines ». Thèse de doct. Massachusetts Institute of Technology.
- BULLOCK, I. M., R. R. MA et A. M. DOLLAR (2013). « A Hand-centric classification of human and robot dexterous manipulation ». In : *IEEE Transactions on Haptics* 6.2, p. 129–144.
- BULLOCK, I. M. et al. (2013). « Grasp Frequency and Usage in Daily Household and Machine Shop Tasks ». In : *IEEE Transactions on Haptics* 6.13, p. 296–308.
- BURDEA, G. et T.H. SPEETER (1989). « Portable dexterous force feedback master for robot telemanipulation ». In : *Proceedings of the NASA conference on space telerobotics*. T. 11, p. 153–161.
- BURDEA, G. et J. ZHUANG (1991). « Dexterous Telerobotics with force feedback – an overview. Part 1 : Human factors ». In : *Robotica* 9, p. 171–178.
- BURDEA, G.C. (1999). « Invited review : the synergy between virtual reality and robotics ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15.3, p. 400–410.
- ÇAVUŞOĞLU, M.C. et D. FEYGIN (2001). *Kinematics and dynamics of PHANTOM™ model 1.5 haptic interface*. Rapp. tech. UCB/ERL M01/15. University of California.
- CHERNOV, N. et C. LESORT (2005). « Least square fitting of circles ». In : *Springer Journal of Mathematical Imaging and Vision* 23, p. 239–252.
- CHOI, B.H. et H.R. CHOI (1999). « A semi-direct drive hand exoskeleton using ultrasonic motor ». In : *Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction*.
- CINI, G. et al. (2005). « A novel fingertip haptic device for display of local contact geometry ». In : *Proceedings of the IEEE Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, p. 602–605.
- COLE, K.J. et J.H. ABBS (1986). « Coordination of three-joint digit movements for rapid finger-thumb grasp ». In : *Journal of Neurophysiology* 55.6, p. 1407–1423.
- COLGATE, J.E. et J.M. BROWN (1994). « Factors affecting the Z-width of a haptic display ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3205–3210.
- CUTKOSKY, M.R. (1989). « On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 5.3, p. 269–279.
- DAAMS, B.J. (1994). *Human force exertion in user-product interaction – background for design*. Delft University Press.

- D'EON, E. et D. LUEBKE (2008). « Advanced techniques for realistic real-time skin rendering ». In : *Nguyen, H., GPU Gems 3, Chapter 14*. Addison-Wesley, p. 293–348.
- DÍAZ, I. et J.J. GIL (2010). « Influence of vibration modes and human operator on the stability of haptic rendering ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 26.1, p. 160–165.
- DUN, S. et al. (2007). « The relationship between age and baseball pitching kinematics in professional baseball pitchers ». In : *Journal of Biomechanics* 40.2, p. 265–270.
- ELGENDI, M., F. PICON et N. MAGNENAT-THALMANN (2012). « Real-time speed detection of hand gesture using Kinect ». In : *Proceedings of the Workshop on Autonomous Social Robots and Virtual Humans, Annual Conference on Computer Animation and Social Agents*.
- ENDO, T., T. YOSHIKAWA et H. KAWASAKI (2010). « Collision avoidance control for a multi-fingered bimanual interface ». In : *Proceedings of the Eurohaptics Conference*, p. 251–256.
- ENDO, T. et al. (2011). « Five-fingered haptic interface robot : Hiro III ». In : *IEEE Transactions on Haptics* 4.1, p. 14–27.
- ERICSON, C. (2004). *Real-Time Collision Detection*. CRC Press.
- ESCAIDA NAVARRO, S. et al. (2013). « Methods for safe human-robot-interaction using capacitive tactile proximity sensors ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 1149–1154.
- FANG, H., Z. XIE et H. LIU (2009). « An exoskeleton master hand for controlling DLR/HIT hand ». In : *Proceedings of the IEEE International conference on Intelligent robots and systems*, p. 3703–3708.
- FEIX, T. et al. (2009). « A Comprehensive Grasp Taxonomy ». In : *Robotics, Science and Systems Conference : Workshop on Understanding the Human Hand for Advancing Robotic Manipulation*.
- FESTO (2014). *ExoHand – human-machine interaction*. URL : <http://www.festo.com/>.
- FITZGIBBON, A., M. PILU et R.B. FISHER (1999). « Direct least square fitting of ellipses ». In : *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21.5, p. 476–480.
- FLASH, T. et N. HOGAN (1985). « The coordination of arm movements : an experimentally confirmed mathematical model ». In : *Journal of Neuroscience* 5.7, p. 1688–1703.
- FLEISIG, G.S. et al. (1999). « Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development ». In : *Journal of Biomechanics* 32.12, p. 1371–1375.
- FONTANA, M., M. BERGAMASCO et F. SALSEDO (2009). « Mechanical design and experimental characterization of a novel hand exoskeleton ». In : *Proceedings of the AIMETA*.
- FONTANA, M. et al. (2009). « Mechanical design of a novel hand exoskeleton for accurate force displaying ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1704–1708.
- FOUMASHI, M.M., M. TRONCOSSI et V. PARENTI CASTELLI (2011). *State-of-the-art of hand exoskeleton systems*. Rapp. tech. Università di Bologna – DIEM.

- FRISOLI, A. et al. (2007). « Kinematic design of a two contact points haptic interface for the thumb and index fingers of the hand ». In : *ASME Journal of Mechanical Design* 129.5, p. 520–529.
- FUCHS, P., G. MOREAU et P. GUITTON (2011). *Virtual reality : concepts and technologies*. CRC Press.
- FURUKAWA, T. et al. (2007). « Encountered-type visual haptic display using flexible sheet ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 479–484.
- FURUYA, S., M. FLANDERS et J.F. SOECHTING (2011). « Hand kinematics of piano playing ». In : *Journal of Neurophysiology* 106.6, p. 2849–2864.
- GANDER, W., G.H. GOLUB et R. STREBEL (1994). « Least-squares fitting of circles and ellipses ». In : *Springer BIT Numerical Mathematics* 34.4, p. 558–578.
- GAUSSORGUES, G. (1993). *Infrared thermography*. Springer.
- GIACHRITSIS, C. et al. (2009). « Evaluation of weight perception during unimanual and bimanual manipulation of virtual objects ». In : *Proceedings of the World Haptics Conference*, p. 629–634.
- GICQUEL, P. et al. (2001). « TAO 2000 : A generic control architecture for advanced computer aided teleoperation systems ». In : *Proceedings of the ANS 9th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*.
- GOSSELIN, F. (2000). « Développements d'outils d'aide à la conception d'organes de commande pour la téléopération à retour d'effort ». Thèse de doct. Poitiers University.
- (2012). « Guidelines for the design of multi-finger haptic interfaces for the hand ». In : *Proceedings of the 19th CISM-IFTOMM RoManSy Symposium*, p. 167–174.
- GOSSELIN, F., C. BIDARD et J. BRISSET (2005). « Design of a high fidelity haptic device for telesurgery ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 205–210.
- GOSSELIN, F. et al. (2005). « Design of a wearable haptic interface for precise finger interactions in large virtual environments ». In : *Proceedings of the IEEE Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, p. 202–207.
- GRANGE, S. et al. (2001). « The Delta haptic device ». In : *Journal of Mechatronics*.
- GREINER, T.M. (1991). *Hand anthropometry of U.S. army personnel*. Rapp. tech. AD-A244 533.
- GREWAL, M.S. et A.P. ANDREWS (2001). *Kalman filtering : theory and practice using Matlab*. John Wiley et Sons.
- GRINYAGIN, I.V., E.V. BIRYUKOVA et M.A. MAIER (2005). « Kinematic and dynamic synergies of human precision-grip movements ». In : *Journal of Neurophysiology* 94.4, p. 2284–2294.
- HAYWARD, V. (1995). « Toward a seven axis haptic device ». In : *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and systems*. T. 3, p. 133–139.
- HAYWARD, V. et al. (2004). « Haptic interfaces and devices ». In : *Sensor Review* 24.1, p. 16–29.

- HIRASHIMA, M. et al. (2008). « Kinematic chain of overarm throwing in terms of joint rotations revealed by induced acceleration analysis ». In : *Journal of Biomechanics* 41.13, p. 2874–2883.
- HIRO III. *Datasheet : Opposed-type Multi-Fingered Haptic Interface Robot III*. Kawasaki & Mouri Laboratory, Faculty of Engineering, Gifu University.
- HIROTA, K. et M. HIROSE (1995). « Simulation and presentation of curved surface in virtual reality environment through surface display ». In : *Proceedings of the Virtual Reality International Symposium*, p. 211–216.
- HU, Y. (2009). « Kinematics and dynamics of a master manipulator ». In : *Journal of Modern Applied Science* 3.3, p. 155–160.
- JAKOBSON, L.S. et M.A. GOODALE (1991). « Factors affecting higher-order movement planning : a kinematic analysis of human prehension ». In : *Experimental Brain Research* 86.1, p. 199–208.
- JONES, L.A. (1997). « Dexterous hands : human, prosthetic, and robotic ». In : *Presence* 6.1, p. 29–56.
- JONES, L.A. et S.J. LEDERMAN (2006). *Human hand function*. Oxford, NY : Oxford University Press.
- KAMAKURA, N. et al. (1980). « Patterns of static prehension in normal hands ». In : *American Journal of Occupational Therapy* 34, p. 437–445.
- KANZAWA, Y. et Y. KIMURA (2011). « Human skin detection by visible and near-infrared imaging ». In : *Proceedings of the IAPR Conference on Machine Vision Applications*, p. 503–507.
- KELLEY, C.T. (1999). *Iterative methods for optimization*. Society for Industrial et Applied Mathematics, Philadelphia.
- KOYAMA, T. et al. (2002). « Multi-fingered exoskeleton haptic device using passive force feedback for dexterous teleoperation ». In : *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 2905–2910.
- KRANJEC, J. et al. (2014). « Novel Methods for noncontact heart rate Measurement : a feasibility study ». In : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 63.4, p. 838–847.
- KUCHENBECKER, K.J. et al. (2008). « The touch thimble : providing fingertip contact feedback during point-force haptic interaction ». In : *Proceedings of the IEEE Haptics Symposium*, p. 239–246.
- KUNESCH, E., F. BINKOFSKI et H.J. FREUND (1989). « Invariant temporal characteristics of manipulative hand movements ». In : *Experimental Brain Research* 78, p. 539–546.
- LARSEN, E. et al. (2000). « Fast proximity queries with swept sphere volumes ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3719–3726.
- LEDERMAN, S.J. et R.L. KLATZKY (2009). « Haptic perception : a tutorial ». In : *Attention, Perception and Psychophysics* 71.7, p. 1439–1459.

- LELIEVELD, M.J., T. MAENO et T. TOMIYAMA (2006). « Design and development of two concepts for a 4 DOF portable haptic interface with active and passive multi-point force feedback for the index finger ». In : *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*.
- LIU, L. et al. (2014). « Development of Two-handed multi-finger haptic interface SPIDAR-10 ». In : *Proceedings of the Eurohaptics Conference*, p. 176–183.
- LOUREIRO, R.C.V. et W.S. HARWIN (2007). « Reach and Grasp therapy : design and control of a 9-dof robotic neuro-rehabilitation system ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, p. 757–763.
- MAEKAWA, H. et J.M. HOLLERBACH (1998). « Haptic display for object grasping and manipulating in virtual environment ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 2566–2573.
- MAHARYTA, A. (2013). *Methods and circuits for measuring mutual and self capacitance*. U.S. Patent 8,358,142 B2.
- MARKOVSKY, I. et S. VAN HUFFEL (2007). « Overview of total least squares methods ». In : 87, p. 2283–2302.
- MARTIN, S. et N. HILLIER (2009). « Characterization of the Novint falcon haptic device for application as a robot manipulator ». In : *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation*.
- MASSIE, T.H. et J.K. SALISBURY (1994). « The PHANTOM Haptic Interface : A Device for Probing Virtual Objects ». In : *Proceedings of the ASME Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. Chicago, IL.
- MCNEELY, W.A. (1993). « Robotic graphics : a new approach to force feedback for virtual reality ». In : *Proceedings of the IEEE International Symposium on Virtual Reality*, p. 336–341.
- MILLET, G. et al. (2009). « The ultimate haptic device : first step ». In : *Proceedings of the Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces*, p. 273–278.
- MONROY, M. et al. (2008). « MasterFinger : multi-finger haptic interface for collaborative environments ». In : *Proceedings of the Eurohaptics Conference*, p. 411–419.
- MONTGOMERY, D.C. et G.C. RUNGER (2003). *Applied statistics and probability for engineers*. 3rd. John Wiley et Sons.
- NAGASAKI, H. (1989). « Asymmetric velocity and acceleration profiles of human arm movements ». In : *Experimental Brain Research* 74.2, p. 319–326.
- NAKAGAWARA, S. et al. (2005). « An encounter-type multi-fingered master hand using circuitous joints ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 2667–2672.
- NAPIER, J.R. (1956). « The prehensile movements of the human hand ». In : *Journal of Bone and Joint Surgery* 38B, p. 902–913.

- NETO, O.P. et al. (2012). « The effect of hand dominance on martial arts strikes ». In : *Human Movement Science* 31.4, p. 824–833.
- NF ISO 5725 (1994). « Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure ». In : *International Organization for Standardization* 18 pages.
- NF X 35-104 (1983). « Postures et dimensions pour l’homme au travail sur machines et appareils ». In : *French Standards Association* 10 pages.
- NISHINO, Y., Y. KUNII et H. HASHIMONO (1997). « 20 DOF haptic device for the interaction with virtual environments ». In : *Proceedings of the International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, p. 85–92.
- NOVOTNY, P.M. et N.J. FERRIER (1999). « Using Infrared Sensors and the Phong illumination model to measure distances ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1644–1649.
- OPPENHEIM, A.V. et R.W. SCHAFER (1989). *Discrete-time signal processing*. Prentice-Hall.
- PAVLIDIS, I. et P. SYMOSEK (2000). « The Imaging Issue in an Automatic Face/Disguise Detection System ». In : *Proceedings of the Workshop on Computer Vision Beyond the Visible Spectrum : Methods and Applications*, p. 15–24.
- PLUMET, F., G. MOREL et P. BIDAUD (1995). « Shall we use a dynamic model to control the motions of industrial manipulators ? ». In : *Proceedings of the 9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, p. 235–240.
- PRATTICCHIZZO, D., C. PACCHIEROTTI et G. ROSATI (2012). « Cutaneous force feedback as a sensory substraction technique in haptics ». In : *IEEE Transactions on Haptics* 5 (4), p. 289–300.
- RAMOS PEON, A. et D. PRATTICCHIZZO (2013). « Reaction times to constraint violation in haptics : comparing vibration, visual and audio stimuli ». In : *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference*, p. 657–661.
- ROLLAND, J., L. DAVIS et Y. BAILLOT (2001). « A survey of tracking technology for virtual environments ». In : *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum, p. 67–112.
- ROZIERE, D. (2013). *Three-Dimensional man/machine interface*. U.S. Patent 20130307776 A1.
- RUFFALDI, E., C.A. AVIZZANO et P. TRIPICCHIO (2008). « Surface perception in a large workspace encounter interface ». In : *Proceedings of the IEEE International Symposium on robot and human interactive communication*, p. 21–26.
- RUFFALDI, E. et al. (2011). « Haptic rendering of juggling with encountered type interfaces ». In : *Presence* 20.5, p. 480–501.
- RYU, D. et al. (2010). « T-less : a novel touchless human-machine interface based on infrared proximity sensing ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 5220–5225.
- SALISBURY, K., F. CONTI et F. BARBAGLI (2004). « Haptic rendering : introductory concepts ». In : *IEEE Computer Graphics and Applications* 24.2, p. 24–32.

- SAMUR, E. (2012). *Performance Metrics for Haptic Interfaces*. Springer-Verlag, London.
- SANCHO-BRU, J.L. et al. (2001). « A 3D dynamic model of human finger for studying free movements ». In : *Journal of Biomechanics* 34.11, p. 1491–1500.
- SANTELLI, M., M. FLANDERS et J. F. SOECHTING (1998). « Postural hand synergies for tool use ». In : *Journal of Neuroscience* 18.23, p. 10105–10115.
- SATO, K. et al. (2007). « Haptic telexistence ». In : *Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. 10.
- SATO, M. (2002). « SPIDAR and virtual reality ». In : *Proceedings of the World Automation Congress*, p. 17–23.
- SHERIDAN, T.B. (1992). *Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control*. MIT Press.
- SHIGETA, K., Y. SATO et Y. YOKOKOHI (2007). « Motion planning of encountered-type haptic device for multiple fingertips based on minimum distance point information ». In : *Proceedings of the IEEE Joint eurohaptics conference and symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, p. 188–193.
- SHIMOGA, K.B. (1993a). « A survey of perceptual feedback issues in dexterous telemanipulation : Part 1. Finger force feedback ». In : *Proceedings of the International Symposium on Virtual Reality*, p. 271–279.
- (1993b). « A Survey of perceptual feedback issues in dexterous telemanipulation : Part 2. Finger touch feedback ». In : *Proceedings of the IEEE International Symposium on Virtual Reality*. Seattle, WA, p. 271–279.
- SOLAZZI, M., A. FRISOLI et M. BERGAMASCO (2010). « Design of a novel finger haptic interface for contact and orientation display ». In : *Proceedings of the IEEE Haptics symposium*, p. 129–132.
- SOLAZZI, M. et al. (2007). « A fingertip haptic display for improving local perception of shape cues ». In : *Proceedings of the IEEE Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, p. 409–414.
- SOLAZZI, M. et al. (2012). « Dynamics modeling of an encountered haptic interface for ball catching and impact tasks simulation ». In : *Proceedings of the Eurohaptics Conference – Part I*, p. 540–551.
- SOMMERICH, C.M., W.S. MARRAS et M. PARNIANPOUR (1996). « A quantitative description of typing biomechanics ». In : *Journal of Occupational Rehabilitation* 6.1, p. 33–55.
- STERGIOPOULOS, P., P. FUCHS et C. LAURGEAU (2003). « Design of a 2-finger hand exoskeleton for VR grasping simulation ». In : *Proceedings of the Eurohaptics Conference*, p. 80–93.
- STMICROELECTRONICS (2013). « VL6180X : Proximity and ambient light sensing (ALS) module ». In : *Datasheet, available at http://www.st.com/st-web-ui/static/active/jp/resource/technical/document/data_brief/DM00078006.pdf*.
- SUN, Z., X. MIAO et X. LI (2009). « Design of a bidirectional force feedback dataglove based on pneumatic artificial muscles ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, p. 1767–1771.

- SWANSON, A.B. (1964). « Evaluation of impairment of function in the Hand ». In : *Surgical Clinics of North America* 44, p. 925–940.
- TACHI, S. et al. (1994). « A construction method of virtual haptic space ». In : *Proceedings of the International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence*, p. 131–138.
- TAN, H. Z. et al. (1994). « Human factors for the design of force-reflecting haptic interfaces ». In : *Dynamic Systems and Control* 55-1, p. 353–359.
- TAYLOR, C.L. et R.J. SCHWARTZ (1955). « The anatomy and mechanics of the human hand ». In : *Artificial Limbs* 2.2, p. 22–35.
- TOWNSEND, W.T. (1988). *The effect of transmission design on force-controlled manipulator performance*. Rapp. tech. MIT Artificial Intelligence Laboratory.
- TRANNOY, G., J. LOZADA et C. MÉGARD (2008). *IHS10, Etude des interactions conducteur commandes véhicule d'une voiture Peugeot 308*. Rapp. tech. DTSI/SRCI/08-522. CEA.
- TUBIANA, R. (1984). « Architecture and functions of the hand ». In : *Examination of the hand and upper limb*. Philadelphia, PA : Saunders.
- TURKI, L. et P. COIFFET (1995). « Dextrous telemanipulation with force feedback in virtual reality ». In : *Proceedings of the ACM-SIGCHI VRST*, p. 193–202.
- VALLBO, Å.B. et R.S. JOHANSSON (1984). « Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation ». In : *Human Neurobiology* 3, p. 3–14.
- VAN ADRICHEM, L. (2009). « Avoiding overshoot ». In : *DSPE Mikroniek* 3, p. 36–40.
- VAN DER LINDE, R.Q. et al. (2002). « THE HapticMaster, a new high-performance haptic interface ». In : *Proceedings of the Eurohaptics Conference*, p. 1–5.
- WELCH, C.M. et al. (1995). « Hitting a baseball : a biomechanical Description ». In : *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 22.5, p. 193–201.
- YAMADA, K. et al. (2000). « 4+4 fingers haptic display in the mixed reality environment ». In : *Proceedings of the ICAT Conference*.
- YOKOKOHI, Y., J. KINOSHITA et T. YOSHIKAWA (2001). « Path planning for encountered-type haptic devices that render multiple objects in 3D space ». In : *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference*, p. 271–278.
- YOKOKOHI, Y. et al. (2005). « Designing an encountered-type haptic display for multiple fingertip contacts based on the observation of human grasping behaviors ». In : *International Journal of Robotics Research* 24.9, p. 717–729.
- YOSHIKAWA, T. et A. NAGURA (1997). « A touch and force display system for haptic interface ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3018–3024.
- (1999). « A three-dimensional touch/force display system for haptic interface ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 2943–2951.
- ZAREMSKI, J.L. et B.J. KRABAK (2012). « Shoulder injuries in the skeletally immature baseball pitcher and recommendations for the prevention of injury ». In : *Journal of the American Academy of Physical Medicine and Rehabilitation* 4.7, p. 509–516.

ZHENG, J.Z., S. DE LA ROSA et A.M. DOLLAR (2011). « An investigation of grasp type and frequency in daily household and machine shop tasks ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 4169–4175.

Liste des publications

Ces travaux ont fait l'objet des publications suivantes :

- A. Chabrier, F. Gonzalez, F. Gosselin et W. Bachta, *Analysis of the Directions in which Forces are Applied on the Hand During Manual Manipulation and Exploration*, à paraître dans les Proceedings de la conférence IEEE World Haptics 2015 ;
- F. Gonzalez, W. Bachta et F. Gosselin, *Smooth transition-based control of encounter-type haptic devices*, à paraître dans les Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation en 2015 ;
- F. Gonzalez, F. Gosselin et W. Bachta, *A 2D infrared instrumentation for close-range finger position sensing*, à paraître dans les IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, en 2015 ;
- F. Gonzalez, F. Gosselin, W. Bachta, *Analysis of hand contact areas and interaction capabilities during manipulation and exploration*, paru dans IEEE Transactions on Haptics, volume 7, issue 4, pages 415-429, 2014 ;
- F. Gonzalez, F. Gosselin, W. Bachta, *A framework for the classification of dexterous haptic interfaces based on the identification of the most frequently used hand contact areas*, paru dans les Proceedings de la conférence IEEE World Haptics 2013, pages 461-466.

