



HAL
open science

Interaction en Environnements Immersifs et Retours d'Effort Passifs

Alexis Paljic

► **To cite this version:**

Alexis Paljic. Interaction en Environnements Immersifs et Retours d'Effort Passifs. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 2004. Français. NNT : . tel-01479203

HAL Id: tel-01479203

<https://minesparis-psl.hal.science/tel-01479203>

Submitted on 28 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PARIS 6

Spécialité :
Informatique

soutenue par :
Alexis Paljic

le 26 avril 2004

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PARIS 6

Sujet de la thèse :

**Interaction en environnements immersifs
et retours d'effort passifs**

devant le jury composé de :

Président :	Jean-Claude GUINOT	Professeur, Université Pierre et Marie Curie
Rapporteurs :	Bruno ARNALDI	Professeur, INSA de Rennes
	Pascal GUITTON	Professeur, Université de Bordeaux I
Directrice de thèse :	Sabine COQUILLART	Directrice de recherche, INRIA
Examineur :	Edouard GENTAZ	Chargé de recherche, CNRS

à Robert.

Remerciements

Je remercie Sabine Coquillard de m'avoir accueilli au sein de l'équipe i3D, en me faisant profiter d'un cadre de travail de haut niveau ainsi que d'un matériel de pointe dans le domaine de la réalité virtuelle. Au cours des deux dernières années, dans une circonstance particulière, la bi-localisation de l'équipe i3D, Sabine a continué à me guider et me conseiller depuis Grenoble, sans compter son temps.

Je remercie Bruno Arnaldi, professeur à l'INSA de Rennes, directeur de l'équipe SIAMES INRIA/CNRS, qui m'a, avec beaucoup d'ouverture et une grande passion de son métier, conseillé lors de mon travail et ouvert de nombreuses perspectives de recherche, notamment lors de l'école d'été CEA-EDF-Inria. Mes remerciements vont également à Pascal Guitton, professeur à l'université de Bordeaux I, directeur du LABRI, pour m'avoir fait partager son expérience et sa grande connaissance du domaine de la réalité virtuelle lors de discussions qui m'ont permis de prendre de la distance par rapport à mon travail. Je remercie Bruno Arnaldi et Pascal Guitton de m'avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail en tant que rapporteurs.

Je remercie Jean Claude Guinot, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, directeur de l'école doctorale SMAE de l'université Pierre et Marie Curie et spécialiste de la nanorobotique, de m'avoir, le premier, incité à faire une thèse, et sans qui je n'aurais pas effectué un travail de recherche, très motivant, dans l'Université de Rutgers aux États-Unis. Je remercie également Jean-Claude Guinot de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Mes remerciements vont également à Edouard Gentaz, chargé de recherche au CNRS, pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse et pour m'avoir conseillé pour la mise en place de tests de facteurs humains, en particulier sur l'étude de la coopération entre utilisateurs en environnements virtuels.

Je tiens à remercier Jean-Marie Burkhardt, pour son aide qui a compté pour beaucoup tout au long de mes travaux : en particulier pour la mise en place des tests de facteurs humains, l'analyse des données et l'interprétation des résultats. Je n'oublierai pas les discussions, toujours abondantes en idées nouvelles, lors desquelles le temps s'est souvent fait oublier. Je tiens également à remercier Jean-Marie pour sa disponibilité, sa patience et sa pédagogie (il en fallait !).

Pour son accueil au sein du Robotics and Mechatronics laboratory à l'université de Rutgers,

l'enthousiasme et l'ouverture d'esprit dans le travail de recherche qu'il m'a appris, je remercie M. Constantinos Mavroidis. *Thanks for the cheering-up Dinos!*

Je remercie Robert Ehrlich, ingénieur à l'INRIA, pour ses chasses au bogue dans mon code, toujours fructueuses, et pour sa disponibilité.

Je remercie tout le personnel de l'INRIA, qui m'a aidé dans mes démarches, je tiens à remercier en particulier Laurence Bourcier, Sandrine Boute, Nathalie Gaudechoux, Françoise Feneck et tout le personnel du bâtiment 23. Merci également à toutes les personnes qui ont accepté de participer aux expériences, ont donné leur temps, et testé les limites de leur patience!

Je remercie Sophie Cluet, directrice de l'INRIA Rocquencourt, James Leifer, Jean-Paul Berroir, Pascal Frey et Hussein Yahia, pour leur conseils et leur assistance au cours de ma thèse.

Merci à mes collègues de l'équipe i3D : Anatole, Boris, Jérôme, Mathieu, Stéphane, Terii.

Merci à mon père et ma mère, *mnogo vas volim mama i tata!*, à mon frère Constantin *Hvala ti brate moj, volim te i ljubim te* Nastassia! Merci à Gordana pour m'avoir toujours aidé, et m'avoir soutenu à un moment difficile. Merci à Zehra, Necdet, et Korkmaz pour m'accueillir avec autant de chaleur. Merci à ma Burcu.

Merci à "Jaco" Jacopo Grazzini, "Falsar" Julien Fauqueur, Nicolas Tarrin, Aïcha el Golli, Claire Delforge, François Peron et Amandine Robin.

Je tiens à remercier Marc et Dina, Robert et Béatrice, Jean-luc et Michèle, Jean et Marie pour leur soutien. Merci à tous mes amis.

Burcu, *seni seviyorum*.

Résumé

Le retour d'effort consiste à restituer à un utilisateur des informations de forces, d'effort ou tactiles, calculées par la simulation du monde virtuel avec lequel il interagit. Les retours d'efforts passifs sont définis par Swanson [87] comme des méthodes permettant de renvoyer des informations de type haptique sans apporter d'énergie à l'utilisateur. Les retours d'effort passifs sont souvent des solutions techniquement plus simples et plus avantageuses en termes de coût que les systèmes actifs.

Dans nos travaux, nous proposons et évaluons de nouvelles méthodes de retour d'effort passif en environnements 2D ou immersifs, et nous étudions l'influence de la distance de manipulation en environnements immersifs. Ceci nous a amené à conduire quatre expériences relatives au retour d'effort passif, basées sur l'interaction entre le sens de la vue et celui du toucher, et une expérience étudiant l'influence de la distance de manipulation sur la performance des utilisateurs lors d'une tâche de sélection dans un environnement immersif : le plan de travail virtuel.

- Nous avons d'abord étudié la possibilité de fournir un retour d'effort en couples de forces grâce à la technique du retour pseudo-haptique. Le retour pseudo-haptique, proposé par Lécuyer et al. [58], est basé sur le couplage d'un retour visuel et des actions de l'utilisateur sur un périphérique d'entrée offrant une résistance mécanique. Ce couplage visuel/tactile a permis de simuler des ressorts virtuels, comparables à des ressorts réels. Nous avons mené une expérience, basée sur des techniques psychophysiques, qui démontre la possibilité de fournir une information haptique en couples de forces en utilisant une approche pseudo-haptique, et qui compare deux types de périphériques d'entrée, isométrique et élastique, pour sa mise en oeuvre.*
 - Nous avons ensuite proposé un périphérique de retour haptique passif, sur le plan de travail virtuel, inspiré du retour pseudo-haptique. L'information haptique passive provient de l'action de pression de l'utilisateur sur le périphérique, influencée par le retour visuel. Du fait que le périphérique est tenu dans la main, sans liaison avec le sol, les forces retournées sont internes, i.e. elles ne prennent pas appui au sol. Nous évaluons ce périphérique selon un critère de perception de forces de frottement dans des zones virtuelles placées dans l'espace.*
 - Ce périphérique est ensuite évalué selon un autre critère, celui de son apport à la coopération entre deux utilisateurs devant effectuer ensemble une tâche de déplacement d'un objet virtuel. Chaque utilisateur dispose du périphérique pour agir sur cet objet. La trajectoire*
-

de l'objet, résultant des actions des deux utilisateurs, est étudiée. Nous observons que le périphérique améliore l'efficacité avec laquelle les utilisateurs effectuent la tâche, comparativement à une méthode sans information haptique.

- Nous explorons ensuite la possibilité d'effectuer un retour d'effort passif, en forces externes. Nous désignons par forces externes des forces pouvant contraindre les mouvements de l'utilisateur par rapport à un référentiel relié au sol, par opposition aux forces internes provenant de systèmes portables. Nous proposons un périphérique nouveau, appelé "auto-contraint", basé sur l'utilisation de câbles et d'un système de freinage. Le périphérique est évalué sur la base d'une expérience de mesure de résolution humaine, et comparé à une version sans dimension haptique du périphérique, uniquement visuelle. Enfin, le périphérique est porté sur un système immersif, le plan de travail virtuel, montrant son adaptabilité. Sur la base d'essais informels sur le plan de travail virtuel, le système apporte des sensations haptiques.*
- Nous avons mené une cinquième expérience, transversale aux précédentes, portant sur l'effet de la distance de manipulation en environnement virtuel. Nous la définissons comme la distance séparant la main de l'utilisateur de l'objet manipulé. La manipulation directe est la situation où la main de l'utilisateur se trouve sur l'objet manipulé. Les résultats indiquent que la manipulation directe et la manipulation à 20 centimètres de distance sont plus efficaces que pour des distances de 40 et 55 centimètres. Ces résultats ont guidé nos choix pour la mise en oeuvre de méthodes de retour passif en environnement immersifs, et apportent des informations utiles pour le développement d'interfaces en environnements immersifs.*

Mots clés :

réalité virtuelle, retours d'effort passifs, retour pseudo-haptique, environnements immersifs, retour d'effort "auto-contraint", plan de travail virtuel, interaction entre vision et toucher, couples de forces, psychophysique, distance de manipulation, tâche coopérative.

Table des matières

Résumé	7
Table des Matières	13
Abréviations	15
Introduction	17
1 État de l’art et définitions	23
1.1 Le retour d’effort	24
1.1.1 Le retour d’effort actif	24
1.1.2 Le retour d’effort passif	25
1.1.2.1 Contraintes rigides et élastiques non contrôlées par ordina- teur, ou “props”	26
1.1.2.2 Contraintes rigides contrôlées par ordinateur	28
1.1.2.3 Contraintes élastiques contrôlées par ordinateur	29
1.1.2.4 Illusions haptiques	31
1.1.2.5 Systèmes mixtes	32
1.1.3 Forces internes et externes	34
1.2 Manipulation directe en environnements virtuels	35
1.2.1 Interaction homme-application	35
1.2.2 Ergonomie	35
1.2.3 Visualisation en EV	37
1.2.3.1 Stéréoscopie	37
1.2.3.2 Accommodation, convergence	37
1.2.3.3 Point de vue dynamique	38
1.2.3.4 Superposition des espaces réel et virtuel	38
1.2.4 Manipulation directe et manipulation à distance	40
1.2.4.1 Distance de manipulation et commande absolue	41
1.2.4.2 Distance de manipulation et commande relative	41
1.2.4.3 Conditions nécessaires pour permettre la manipulation directe	42
1.2.5 Systèmes de visualisation en RV	42
1.2.5.1 Les casques immersifs	42
1.2.5.2 Les casques See-Through	42
1.2.5.3 Les casques HMPD	44

1.2.5.4	Les systèmes à projection sur grands écrans	44
1.2.5.5	Fish Tank	46
1.2.5.6	Autres systèmes	47
1.2.6	Tâches élémentaires	48
1.2.7	Techniques de Sélection et Manipulation	49
1.2.7.1	Main virtuelle	50
1.2.7.2	Rayon virtuel	50
1.2.7.3	Lampe torche virtuelle	51
1.2.7.4	Techniques “image plane”	51
1.2.7.5	Rayon virtuel à distance variable	52
1.2.7.6	Go-go	53
1.2.7.7	World in Miniature	53
1.2.7.8	Agrégation de techniques et techniques hybrides	54
2	Le retour pseudo-haptique en couples	57
	Introduction	59
2.1	Expériences précédentes sur le retour pseudo-haptique	60
2.1.1	Simulation de ressorts en compression	60
2.1.2	Limites de l’illusion	61
2.2	Le retour d’effort en couples de forces	62
2.2.1	Points d’application	62
2.2.2	Systèmes de retour d’effort en couples de forces	62
2.2.3	Perception	64
2.3	Système proposé pour la simulation de ressorts de torsion pseudo-haptiques	65
2.3.1	Périphérique d’entrée isométrique	67
2.3.2	Périphérique d’entrée élastique	67
2.4	Evaluation	68
2.4.1	Ressorts de torsion réels	69
2.4.2	Procédure	71
2.4.2.1	Facteurs indépendants de l’étude	71
2.4.2.2	Conditions de l’expérience	71
2.4.3	Sujets	72
2.4.4	Données recueillies	72
2.4.5	Résultats	72
2.4.5.1	JND, PSE	72
2.4.5.2	Couple de forces appliqué	76
2.4.5.3	Temps de réponse	76
2.4.5.4	Illusion de déplacement du périphérique	76
2.4.5.5	Type de stratégie	78
2.5	Discussion des résultats	78
2.5.1	JND	78
2.5.2	Distorsion subjective de perception	79
2.5.3	Couples appliqués	80
2.5.4	Temps de réponse	80

2.5.5	Proprioception et illusion haptique	81
2.6	Perspectives	82
2.6.1	Intégration en Environnement Immersif	82
2.6.2	Etude des forces appliquées sur le ressort réel	82
2.6.3	Applications	83
	Conclusion	84
3	Etude de la Distance de Manipulation sur le Plan de Travail Virtuel	85
	Introduction	86
3.1	Observations sur le Plan de Travail Virtuel	88
3.2	Travaux précédents	89
3.2.1	Distance de manipulation	89
3.2.2	Proprioception, visibilité de la main	90
3.2.3	Pointage, déplacement	92
3.3	Première expérience : distance de manipulation	92
3.3.1	Contrôle de la distance de manipulation	93
3.3.2	Tâche de pointage	93
3.3.3	Participants	97
3.3.4	Facteurs étudiés	98
3.3.5	Données recueillies	98
3.3.6	Résultats pour le temps de parcours	98
3.3.7	Mouvements de la main	99
3.3.7.1	Trajectoires	99
3.3.7.2	Courbes de Vitesse	99
3.3.8	Questionnaire : réponses qualitatives des utilisateurs	100
3.4	Deuxième expérience : indice visuel et facteur d'échelle	102
3.4.1	Facteurs étudiés	102
3.4.1.1	Indice visuel	102
3.4.1.2	Facteur d'échelle	102
3.4.1.3	Positions des boules cibles	103
3.4.2	Résultats	103
3.4.2.1	Temps de parcours	103
3.4.2.2	Position de la cible	103
3.4.3	Réponses qualitatives des utilisateurs	105
3.5	Analyse et discussion des résultats des deux études	105
3.5.1	Temps de parcours	105
3.5.1.1	Temps de parcours en fonction des cibles	106
3.5.1.2	Perception stéréoscopique	106
3.5.1.3	Cohérence des informations visuelles et proprioceptives	107
3.5.1.4	Influence de l'indice visuel et du facteur d'échelle	107
3.5.2	Questionnaire	108
	Conclusion	108

4	Retour haptique passif en forces internes en Environnement Immersif	111
	Introduction	112
4.1	Mode de commande	113
4.1.1	Mode relatif ou commande en vitesse	113
4.1.2	Mode absolu ou commande en position	113
4.2	Réaction mécanique	115
4.2.1	Périphérique fixe	115
4.2.2	Périphérique mobile	116
4.2.2.1	Réaction mécanique et commande relative	116
4.2.2.2	Réaction mécanique et commande absolue	116
4.3	Essais sur la commande relative avec un périphérique mobile	117
4.3.1	Solution technique proposée : poignée rigide et capteur de forces	117
4.3.2	Différences entre les expériences de retour pseudo-haptique et le périphérique proposé	120
4.3.3	Tests informels	120
4.4	Essais sur la commande absolue avec périphérique mobile	121
4.4.1	Réaction mécanique : solution de la “balle en mousse”	122
4.4.2	Commande en mouvement absolu	122
4.4.3	Utilisation du Cyberglove pour la mesure de pression	122
	Conclusion	124
5	Le retour haptique auto-contraint	127
	Introduction	128
5.1	Problématique	129
5.2	Principe du retour d’effort proposé	129
5.2.1	Solution technique	130
5.2.1.1	Solution à une dimension	132
5.2.1.2	Solution à deux dimensions	133
5.2.1.3	Solution à trois dimensions	134
5.3	Evaluation du système	136
5.3.1	Méthode	136
5.3.2	Indicateurs de performance	138
5.3.3	Participants	139
5.3.4	Résultats	139
5.4	Discussion des résultats	142
5.4.1	Scores	142
5.4.2	Temps de réponse	142
5.4.3	JND	143
5.4.4	Forces appliquées	143
5.5	Installation et essais du système sur le Plan de Travail Virtuel	144
5.5.1	Essais informels	144
5.6	Perspectives	147
5.6.1	Isotropie, anisotropie	147
5.6.2	Comparaison avec des propriétés réelles	147

5.6.3 Applications	148
Conclusion	149
6 Interaction coopérative	151
Introduction	153
6.1 Mise en oeuvre du mode relatif avec périphérique mobile en coopératif	154
6.1.1 Etudes préliminaires	155
6.1.1.1 Expérience du ballon	155
6.1.1.2 Tests de situations réelles	155
6.1.1.3 Nécessité d'équivoques	157
6.2 Tâche coopérative	157
6.2.1 Avec périphérique en commande relative	157
6.2.2 Avec commande absolue	158
6.3 Architecture logicielle et matérielle	158
6.4 Première évaluation : coopération possible, mais non imposée	160
6.5 Deuxième évaluation : coopération imposée	161
6.5.1 Méthode pour imposer la coopération	161
6.5.2 Données recueillies	162
6.5.3 Analyse globale de la trajectoire	163
6.5.3.1 Allure générale des trajectoires	163
6.5.3.2 Descripteurs globaux	163
6.5.3.3 Temps et distance de parcours	166
6.5.4 Analyse locale de la trajectoire	167
6.5.4.1 Déplacements intentionnels sur les trajectoires	167
6.5.4.2 Divergence d'intentions	168
6.5.4.3 Convergence d'intentions	169
Conclusion	172
Conclusion	175
Bibliographie	187
Table des Figures	192
Liste des Tableaux	193
A Trajectoires résultantes lors de l'expérience d'interaction en coopération	195
Index	195

Abréviations

- EV** : Environnement Virtuel
- EVC** : Environnement Virtuel Coopératif
- CAVE** : Cave Automatic Virtual Environment
- d.d.l.** : degré de liberté
- HMD** : Head Mounted Display
- PTV** : Plan de Travail Virtuel

Introduction

Les environnements virtuels peuvent donner une impression spectaculaire d'immersion. Certains systèmes de réalité virtuelle, grâce à des techniques de projection sur grands écrans, couvrent tout le champ de vision humain, les écrans peuvent même entièrement entourer l'utilisateur comme dans le cas des CAVETM. L'ajout d'autres retours sensoriels, par exemple le rendu sonore tridimensionnel ou les retours d'effort, peuvent contribuer à améliorer la sensation d'immersion dans un monde simulé.

Cependant, l'interaction entre l'homme et l'environnement simulé par ces systèmes est encore loin d'être intuitive et réaliste. Contrairement au domaine de l'image de synthèse dans lequel il est parfois difficile de distinguer une image synthétique d'une photographie, l'interaction vécue dans un monde simulé ne peut pas aujourd'hui être confondue avec la réalité. Le réalisme, au sens d'une simulation impossible à distinguer de la réalité, n'est pas un objectif avéré de la recherche en réalité virtuelle, même si il représente une idée du stade ultime de la réalisation de systèmes immersifs. La problématique aujourd'hui est plutôt celle d'une volonté de développer des systèmes matériels et des méthodes d'interaction les plus efficaces et les plus intuitifs possibles pour une application donnée.

Une définition du développement de méthodes d'interaction est proposée par Preece et al. [78] : *“le développement d'outils interactifs pour aider les utilisateurs dans leur vie quotidienne et professionnelle”*. Le développement de méthodes d'interaction et des interfaces matérielles associées est une discipline complexe et pluridisciplinaire, alliant l'ingénierie, l'informatique, l'ergonomie ou encore la psychologie. La mise en place technique d'une méthode d'interaction et d'une interface matérielle n'est qu'une étape du processus de développement et appelle à être évaluée. Cette validation prend la forme de tests de facteurs humains dont l'objectif est de confronter un système proposé à la réalité des utilisateurs.

L'interaction en Environnement Virtuels est encore un domaine assez jeune et les évaluations des solutions matérielles (systèmes de RV) et logicielles (méthodes d'interaction) sont nécessaires.

Nos travaux se placent dans le domaine du retour d'effort en environnement virtuel, c'est à dire l'apport d'informations de forces ou de toucher à l'utilisateur dans une simulation de réalité virtuelle.

La vision est le sens le plus utilisé en environnements virtuels tant par l'importance des infor-

mations véhiculées que par sa dominance relativement aux autres sens. Le toucher est, après la vision, un sens privilégié et peut améliorer une simulation de réalité virtuelle : plusieurs études ont montré que retour d'effort est une technique permettant d'améliorer la sensation d'immersion et les performances de manipulation dans un environnement virtuel, dans des domaines comme la simulation médicale [15] ou les environnements virtuels coopératifs [14][81].

Le retour d'effort peut être effectué au travers de périphériques dit *actifs* munis d'actionneurs, comme les bras à retour d'effort, qui fournissent de l'énergie mécanique à l'utilisateur.

Une autre méthode de retour d'effort est proposée au travers de périphériques de retour d'effort dits *passifs*. La caractéristique principale des systèmes de retour d'effort passif est qu'ils n'apportent pas d'énergie mécanique au niveau de la main ou de la partie du corps de l'utilisateur sur laquelle le retour d'effort s'exerce.

Les retours d'effort passifs peuvent être des solutions de retour d'effort intéressantes et peu coûteuses. Leur caractère passif en fait souvent des solutions plus simples techniquement et plus avantageuses en termes de coût, comparativement aux systèmes actifs.

* * *

Dans les travaux présentés dans ce mémoire, nous proposons et évaluons de nouvelles méthodes de retour d'effort passif en environnements 2D ou immersifs, et nous étudions l'influence de la distance de manipulation en environnements immersifs. Nous avons effectué quatre expériences relatives au retour d'effort passif, basées sur l'interaction entre le sens de la vue et celui du toucher, et une expérience étudiant l'influence de la distance de manipulation sur un plan de travail virtuel.

Pour la recherche de *méthodes de retour d'effort passif*, nous avons distingué un facteur principal : le *mode de commande* du déplacement des objets virtuels, qui peut-être *relatif* ou *absolu*. Le mode de commande relatif consiste à commander le déplacement des objets virtuels en spécifiant un vecteur vitesse grâce à un périphérique. Le mode absolu permet de commander les objets virtuels en position, dans ce cas, les mouvements de l'utilisateur dans l'espace sont appliqués à l'objet virtuel manipulé.

Ceci nous a amené à conduire quatre expériences relatives au retour d'effort passif dans des cadres différents :

- une *extension du retour d'effort* pseudo-haptique au retour d'effort en couples de forces (chapitre 2),
- la recherche d'une *méthode de retour d'effort passif* sur le plan de travail virtuel, en commande relative et absolue, renvoyant des forces internes (chapitre 4),
- une méthode de *retour d'effort passif* sur le plan de travail virtuel, en commande absolue, renvoyant des forces externes (chapitre 5),

- une évaluation de l’apport de la méthode de retour d’effort passif en commande relative proposée, lors d’une tâche de *coopération* entre deux utilisateurs (chapitre 6).

Nous avons mené une cinquième expérience (chapitre 3), transversale aux quatre précédentes. Elle porte sur le concept de *distance de manipulation*. Nous la définissons comme la distance séparant la main de l’utilisateur et l’objet manipulé.

La *manipulation directe* est le cas où cette distance est nulle, dans ce cas l’utilisateur manipule les objets virtuels directement avec sa main. La manipulation directe est souvent décrite comme plus naturelle mais nous n’avons pas de connaissances quantitatives quant à l’influence de la distance de manipulation, notamment sur le plan de travail virtuel.

* * *

Dans le premier chapitre de ce mémoire nous proposons des définitions qui seront utilisées au cours des travaux. Nous introduisons d’abord les méthodes de retour d’effort existantes, distinguons les systèmes *passifs* et les systèmes *actifs*, et nous proposons une *classification des systèmes passifs*. Nous définissons également deux types de forces retournées par ces systèmes, les forces *internes* et les forces *externes*. Les systèmes à forces externes sont des systèmes pouvant contraindre les mouvements de l’utilisateur relativement à un référentiel relié au sol, dits à *base fixe*. Les systèmes à forces internes sont des systèmes portables, à base non fixe, ne pouvant contraindre les mouvements de l’utilisateur que relativement à son propre corps.

Ensuite, nous définissons les notions de *distance de manipulation* et de *manipulation directe*. Les principaux systèmes immersifs sont présentés ainsi que les techniques de manipulation en EV. Parallèlement, nous abordons la possibilité de manipulation directe pour ces systèmes et ces techniques.

Nous avons dans un premier temps essayé d’approfondir notre connaissance du retour pseudo-haptique, proposé par Lécuyer et al. [58], en cherchant à l’étendre à un retour d’effort en couples de forces. C’est l’objet de la première expérience, décrite dans le chapitre 2.

Le retour pseudo-haptique est basé sur le couplage d’un retour visuel et des actions de l’utilisateur sur un périphérique d’entrée offrant une résistance mécanique. Ce couplage visuel/tactile a permis de simuler des ressorts virtuels qu’un ensemble d’utilisateurs a pu comparer avec des ressorts réels. Dans ce chapitre, nous décrivons une expérience dont l’objectif est de démontrer la possibilité de fournir une information haptique en couples de forces, et de comparer deux types de périphériques d’entrée, isométrique et élastique, pour la mise en oeuvre de ce retour d’effort. L’expérience met en jeu une tâche de différenciation entre des ressorts de torsion virtuels et réels.

Nous étudions la question du mode de perception des forces selon cette méthode au travers des mesures des forces effectivement appliquées sur le périphérique par les utilisateurs.

Partant du retour d’effort pseudo-haptique, effectué en environnement 2D sur station, décrit dans le chapitre 1 et étendu dans le chapitre 2, nous cherchons à proposer des méthodes de

retour passif en environnements immersifs. La distance de manipulation, que nous définissons comme la distance entre la main de l'utilisateur et l'objet manipulé, est une différence fondamentale entre ces deux environnements. En environnements immersifs comme le PTV, la distance de manipulation peut être nulle, on parle de *manipulation directe*, ou non nulle, on parle alors de *manipulation à distance*.

Nous proposons d'étudier l'influence de la distance de manipulation sur la performance lors d'une tâche de pointage dans l'espace. C'est l'objet du chapitre 3.

Une première expérience est menée pour étudier l'influence de la distance de manipulation sur la performance lors une tâche de positionnement 3D. Dans cette expérience, l'utilisateur sélectionne des objets dans l'espace grâce à un curseur, qu'il contrôle grâce aux mouvements de sa main. Dans une seconde expérience, nous proposons d'étudier l'effet de deux techniques d'interaction sur la performance lors d'une manipulation à distance : d'une part la présence d'un rayon virtuel reliant la main de l'utilisateur et le curseur, d'autre part, l'utilisation d'un facteur d'échelle entre les mouvements de l'utilisateur et ceux du curseur virtuel.

Dans le chapitre 4, nous étudions deux solutions de retour d'effort passif en forces internes sur le plan de travail virtuel. Au vu des résultats du chapitre 3 sur la distance de manipulation, nous choisissons de nous orienter vers les solutions permettant une manipulation directe, utilisant un périphérique mobile, permettant à l'utilisateur de placer sa main au coeur de la scène. Nous abordons deux solutions, l'une en mode *relatif*, l'autre en mode *absolu*, utilisant un périphérique portable, tenu dans la main de l'utilisateur. Nous les évaluons informellement sur un critère de perception du frottement d'un objet virtuel lorsqu'il traverse une zone sur un plan virtuel.

Nous proposons dans le chapitre 5 un périphérique passif en commande absolue et en forces externes. Ce périphérique combine un système à câbles permettant de dissiper l'énergie de l'utilisateur, et une interaction entre le retour visuel et le toucher pour contrôler les forces retournées à l'utilisateur. Une expérience est menée pour évaluer le système consistant en deux sessions de comparaisons de viscosité virtuelle, une session avec utilisation du système (session haptique), une session en manipulation absolue, sans possibilité d'interaction multimodale vue/toucher (session purement visuelle). Enfin, afin d'étudier si ce système de retour d'effort passif peut s'adapter à un large espace de travail dans un environnement immersif, et à la possibilité de manipulation directe, nous l'avons installé et testé informellement sur le plan de travail virtuel.

Enfin, au chapitre 6 nous évaluons le périphérique mobile en commande relative, étudié au chapitre 4, selon un critère différent de celui de la perception de forces de frottement. Nous cherchons à évaluer dans ce chapitre si la méthode avec retour passif permet, pour une tâche de déplacement d'objet, une meilleure coopération entre deux utilisateurs comparativement à une solution en commande absolue sans possibilité de retour d'effort.

La tâche de coopération consiste, pour deux utilisateurs, à déplacer un objet virtuel de manière à relier différents points prédéfinis dans un plan. Pour commander le déplacement de l'objet, deux périphériques sont utilisés, un pour chaque utilisateur. Nous avons mené une expérience consistant en deux sessions : une avec le périphérique passif, l'autre en commande

absolue. Pour chaque session les caractéristiques du mouvement ont été enregistrées (mouvements de l'objet, mouvements des utilisateurs et pression appliquée sur le périphérique). Nous avons cherché à analyser la trajectoire de déplacement résultante de l'objet pour caractériser l'efficacité de la tâche. Nous proposons une approche globale dont l'objectif est de décrire l'allure générale de la trajectoire et une approche locale, dont l'objectif est de comparer les intentions des deux utilisateurs au cours du déplacement.

Chapitre 1

État de l'art et définitions

Dans ce premier chapitre, nous définissons les deux types de retour d'effort, actif et passif. Les systèmes de retour d'effort actif sont munis d'actionneurs et peuvent apporter de l'énergie mécanique à l'utilisateur. Les systèmes passifs ne permettent que de retirer de l'énergie mécanique à l'utilisateur. Nous proposons une classification des systèmes passifs suivant le type de forces renvoyées, rigide ou élastique, et le caractère contrôlé ou non par ordinateur des ces systèmes.

Dans une seconde partie de ce chapitre, nous définissons la distance de manipulation, la manipulation directe et les propriétés des systèmes de visualisation immersifs nécessaires pour permettre la manipulation directe. La distance de manipulation est définie comme la distance séparant la main de l'utilisateur de l'objet virtuel manipulé. La manipulation directe est la situation où la main de l'utilisateur se trouve sur l'objet manipulé, c'est à dire que la distance de manipulation est nulle.

Les principaux systèmes de visualisation en réalité virtuelle sont présentés, et nous considérons la possibilité de manipulation directe pour chacun. Nous abordons ensuite la manipulation directe et la distance de manipulation pour les techniques d'interaction en environnement virtuel, en particulier celles dédiées à la tâche de sélection, une des tâches élémentaires en EV.

1.1 Le retour d’effort

Le retour d’effort permet de transmettre à l’utilisateur des informations de nature haptique¹, provenant du monde virtuel avec lequel il interagit. Le retour haptique concerne donc aussi bien la simulation de forces provenant des contraintes sur un objet virtuel que les informations tactiles comme la texture ou la rugosité d’une surface ou encore les forces de frottement. Nous nous intéressons dans ces travaux au retour d’effort en forces.

Le retour d’effort est souvent considéré comme améliorant la sensation d’immersion dans les environnements virtuels. Des études ont montré son apport dans des domaines tels que la simulation médicale [15] ou les environnements coopératifs [14][81], d’autres études ont montré que le retour d’effort augmente les performances pour certaines tâches.

Différentes approches sont possibles pour simuler un retour d’effort, nous distinguons principalement les systèmes actifs et les systèmes passifs. Une définition possible est de considérer comme actifs les systèmes de retour d’effort contrôlés par ordinateur et passifs les systèmes non contrôlés par ordinateur. Pour nos travaux, nous proposons d’utiliser une définition des systèmes passifs et actifs qui se base sur la notion d’énergie mécanique transmise ou non à l’utilisateur, cette définition a été proposée dans les travaux de Swanson [87] ainsi que dans ceux de Rosenberg et Brave [80].

1.1.1 Le retour d’effort actif

Selon la définition de Swanson, le retour d’effort actif est une technique qui permet d’ajouter et de retirer de l’énergie mécanique à la main de l’utilisateur ou toute partie du corps en contact avec le périphérique haptique. Ce type de retour d’effort est effectué grâce à des périphériques contrôlés par ordinateur comportant des actionneurs permettant d’appliquer activement des forces à l’utilisateur.

Certains systèmes actifs sont plutôt destinés à une utilisation sur station de travail. Les souris à retour d’effort peuvent fournir des informations dans un environnement 2D. L’exemple le plus courant d’environnement 2D est l’environnement WIMP², c’est le système de fenêtres avec un pointeur contrôlé grâce à la souris, devenu un standard sur tous les systèmes de bureau. Un exemple d’utilisation est l’ajout d’informations haptiques dans un environnement WIMP, une souris à retour d’effort peut renvoyer des forces relatives à des événements comme le passage au travers des bords d’une fenêtre. Les personnes malvoyantes peuvent bénéficier de telles informations haptiques. Citons également les joysticks à retour d’effort souvent utilisés sur les systèmes de bureau, dans les applications de jeux par exemple.

Des systèmes plus spécifiques aux configurations de réalité virtuelle ont été développés (Figure 1.1). Les bras à retour d’effort comme le PHANTOM^{TM3} [65] permettent de retourner des forces jusqu’à 6 degrés de liberté dans un espace de travail à trois dimensions. Le Spidar

¹Le terme haptique provient du grec *haptain* qui veut dire “saisir” [11]

²Windows Icons Menus and Pointers

³PHANTOM et SensAble Technologies sont des marques déposées de SensAble Technologies, Inc.

[54][21] est un système à fils, dans lequel la main ou les doigts de l'utilisateur (suivant la version du système) sont reliés à des moteurs par des fils, ceux-ci peuvent se tendre afin de renvoyer des forces. Le système SPIDAR permet une moindre occlusion de la scène virtuelle que les bras à retour d'effort car les fils se voient peu, et les moteurs peuvent être situés hors de l'espace de visualisation. Citons également dans cette catégorie des systèmes actifs les gants à retour d'effort comme le CyberForce [3].

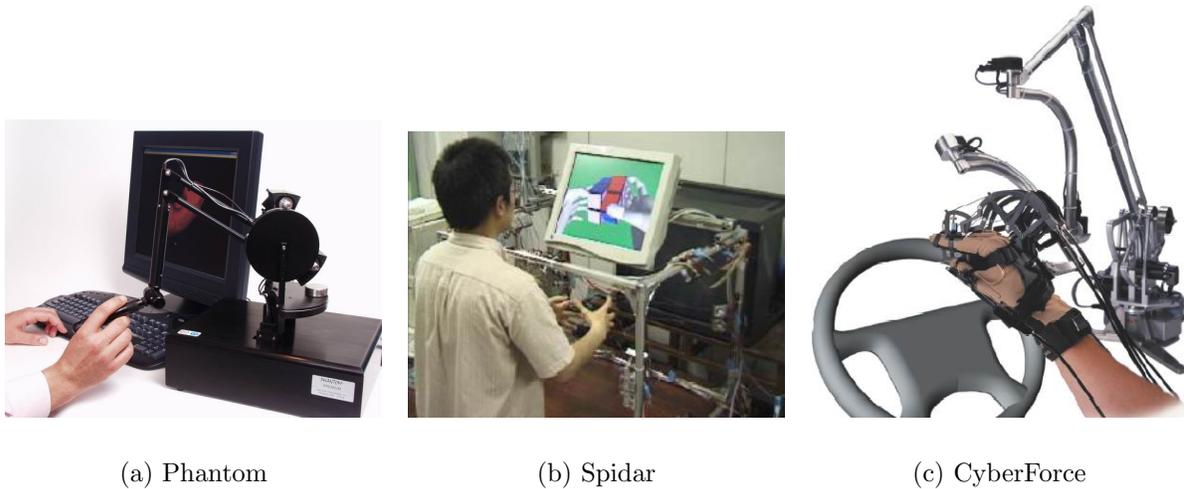


FIG. 1.1 – Systèmes de retour d'effort actif

1.1.2 Le retour d'effort passif

Une définition possible pour les systèmes de retour d'effort passif propose de les considérer comme des systèmes non contrôlés par ordinateur. Cette définition désigne des systèmes comme les “props” qui sont des objets rigides ou déformables qui renvoient des forces simplement par leur forme ou leur texture, et sont une représentation physique d'un l'objet virtuel manipulé.

Swanson [87] propose une définition plus générale des systèmes de retour d'effort passif : *“les systèmes de retour d'effort passifs sont des systèmes énergétiquement passifs, au sens où ils n'ajoutent pas d'énergie cinétique au système et sont seulement capables de retirer, stocker ou rediriger l'énergie cinétique”*. C'est la définition que nous utiliserons dans ce mémoire.

Nous proposons une classification des retours d'effort passifs existants. Pour une partie des systèmes passifs, cette classification est basée sur deux facteurs : le type de contraintes que peut renvoyer le système, rigide ou élastique, et le caractère contrôlé ou non par ordinateur.

Nous distinguons :

- les systèmes à contraintes rigides ou élastiques non contrôlés par ordinateur,
- les systèmes à contraintes rigides contrôlés par ordinateur,
- les systèmes à contraintes élastiques contrôlés par ordinateur,
- les systèmes basés sur des illusions haptiques,
- les systèmes mixtes.

Nous utilisons le terme rigide pour les systèmes capables de stopper rigidement les mouvements de l’utilisateur dans une direction donnée, comme par exemple simuler un mur virtuel. Nous utilisons le terme élastique pour les systèmes ne permettant pas de contrainte rigide, mais qui peuvent freiner les mouvements de l’utilisateur.

Nous décrivons cette classification dans les paragraphes suivants.

1.1.2.1 Contraintes rigides et élastiques non contrôlés par ordinateur, ou “props”

On appelle “props”⁴ les systèmes renvoyant des contraintes rigides ou élastiques, non contrôlés par un ordinateur.

Un “prop” est un objet réel représentant un objet virtuel, manipulé par l’utilisateur, qui du fait de sa présence et de sa forme, fournit une réaction mécanique aux actions de l’utilisateur. Les props permettent de renvoyer des contraintes rigides, si le “prop” est solide, ou des contraintes élastiques, si celui-ci possède une raideur ou une élasticité internes, comme une balle en mousse par exemple.

Un exemple de “prop” est la technique proposée par Hinckley et al. [43] dans le cadre d’une application de navigation au coeur de données d’imagerie médicale. La technique proposée consiste à permettre à l’utilisateur de spécifier un plan de coupe dans une représentation tridimensionnelle d’un cerveau humain, en tenant dans une main une tête de poupée et dans l’autre une plaque reliée à un capteur de suivi de mouvement. La position de la plaque relativement à la tête de la poupée définit le plan de coupe sur le modèle virtuel. La présence de la tête de poupée dans la main de l’utilisateur lui permet de ressentir des informations haptiques relatives à ses actions et l’aide à positionner la tête virtuelle et le plan de coupe.

Une technique similaire, à plus grande échelle, utilisée par Insko et al. [48][67], consiste à utiliser des éléments de décor réel pour ajouter une dimension haptique à un décor virtuel. Leurs travaux mettent en scène un précipice virtuel. Dans le monde virtuel, l’utilisateur peut voir le précipice et marcher le long des bords de celui-ci. Dans l’environnement réel, l’utilisateur marche sur un plancher surélevé par rapport au sol dont les bords représentent les rebords du précipice (Figure 1.3). Ce plancher surélevé permet à l’utilisateur de ressentir sous ses pieds les bords du précipice virtuel.

Lindeman et al. [60] ont proposé l’utilisation d’une surface physique tenue dans la main non dominante. L’utilisateur est immergé dans un monde virtuel grâce à un casque immersif, et peut interagir avec des objets virtuels (icônes de menu par exemple) affichés sur une surface

⁴le terme “prop” veut dire *support* on utilise parfois le terme *accessoire* en français



FIG. 1.2 – Un prop pour la visualisation de données neuro-chirurgicales [43]



(a) L'EV, avec un précipice dans une pièce

(b) L'environnement réel, avec le plancher surélevé représentant les bords du précipice

FIG. 1.3 – Utilisation du décor pour le retour passif [67]

virtuelle coïncidant avec la surface réelle. Lorsqu'il agit sur ces objets virtuels, l'utilisateur perçoit des forces de réaction réelles provenant de la plaque physique.

Hachet et Guitton [41], ont proposé un périphérique nommé CAT (pour Control Action Table) destiné à l'interaction dans les environnements immersifs de grande taille (Figure 1.4). Le CAT est un périphérique à six degrés de liberté, composé d'une tablette sensitive montée sur une structure orientable dans l'espace. Le périphérique est isotonique en rotations et isométrique en translations. Bien qu'il ne soit pas directement destiné au retour d'effort, les auteurs rapprochent son utilisation de celle des props. Lorsqu'un objet virtuel est attaché aux mouvements du CAT, celui-ci renvoie des informations haptiques passives lors de la manipulation [40].

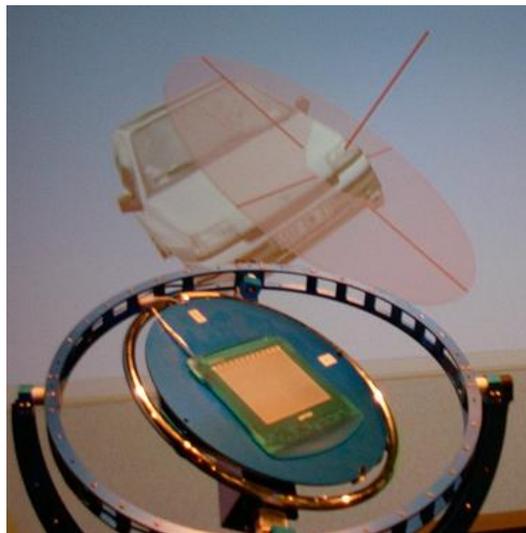


FIG. 1.4 – Le CAT *Control Action Table* proposé par Hachet et Guitton [40][41]

1.1.2.2 Contraintes rigides contrôlées par ordinateur

Systemes à rencontre

Il existe des systèmes dits à *rencontre*, qui permettent de simuler des murs ou des objets virtuels rigides. Ils sont dits “à rencontre” car le principe de fonctionnement de ce type de système est d’aller à la rencontre de la main de l'utilisateur à l’endroit dans l’espace où la contrainte rigide a lieu.

Ces systèmes nécessitent un suivi des mouvements de l'utilisateur pour assurer la rencontre dans l’espace, la partie mécanique contrôlée par ordinateur est le plus souvent un robot de type bras mécanique dont l’effecteur peut parcourir l’espace de manipulation de l'utilisateur.

La position de la main de l'utilisateur est mesurée à tout instant, lorsque celle-ci s'approche d'une zone de l'espace où se trouve un objet virtuel rigide, le bras mécanique vient placer une surface de contact à cet endroit.

Systèmes gouvernables

Des systèmes passifs, contrôlés par ordinateur et réduisant les degrés de liberté de mouvement, sans utiliser de systèmes de freinage, ont été proposés par Colgate et al, sous le nom de COBOTS [23].

Swanson propose de nommer ces systèmes "steerable systems" (ou systèmes gouvernables) car il se basent sur des roues orientées par l'ordinateur pour contraindre les mouvements de l'utilisateur.

Le COBOT est défini comme un système robotique manipulant les objets en collaboration avec l'utilisateur. Pour contraindre les mouvements de l'utilisateur dans un plan, un COBOT constitué d'une roue unique roulant sur un plan a été proposé [23], la direction de la roue est le seul degré de liberté commandé par ordinateur du système (Figure 1.5). Le cobot est relié à une poignée que l'utilisateur peut mouvoir pour commander les mouvements d'un objet virtuel. Le système fonctionne selon deux modes :

- Le mode "libre" pour lequel la roue se place dans la direction vers laquelle la poignée est déplacée, et les mouvements de l'utilisateur sont en conséquence libres dans le plan.
- Le mode de "mur virtuel". Dans ce mode, lorsque l'utilisateur déplace l'objet virtuel vers un mur virtuel, c'est à dire déplace le cobot contre le bord d'une région de contraintes, le contrôleur de l'appareil place la roue de façon perpendiculaire à la contrainte. Ainsi l'utilisateur ressent les bords du mur virtuel.

1.1.2.3 Contraintes élastiques contrôlées par ordinateur

Les systèmes dissipatifs comportent des moteurs ou des actionneurs dont la seule action est le freinage (la dissipation d'énergie) des mouvements humains, sans apport d'énergie au système. Les autres systèmes passifs décrits dans cette classification peuvent être considérés comme dissipatifs, les props ou les systèmes à rencontre ont bien un rôle passif de freinage. Cependant, dans ces travaux nous utiliserons le terme dissipatif pour les systèmes dotés de dispositifs mécaniques comme des freins, ou des amortisseurs, transformant l'énergie mécanique de l'utilisateur en énergie thermique.

Un système nommé PADyC (Passive Arm with Dynamic Constraints) visant des applications d'assistance au geste chirurgical a été proposé par Troccaz et al. [92][84]. Ce système assiste les gestes de l'utilisateur grâce à un manipulateur motorisé qui contraint les mouvements de l'utilisateur en limitant la vitesse de déplacement dans certaines directions.

Le système PTER (Passive Trajectory Enhancing Robot) développé par Book et al. [19], utilise des freins électromagnétiques pour guider les mouvements de l'utilisateur dans un plan (voir Figure 1.6).

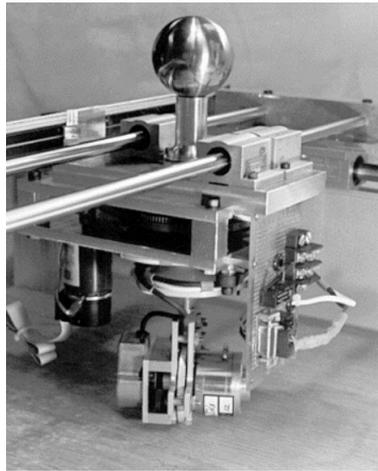


FIG. 1.5 – Un exemple de système passif à contraintes rigides contrôlé par ordinateur : le système gouvernable Cobot. L'utilisateur manipule le périphérique en déplaçant la poignée du système dans un plan. Une roue placée en dessous peut suivre deux comportements : 1) Roue folle, dans ce cas les mouvements ne sont pas contraints, 2) Roue dirigée dans une direction donnée, ce qui limite les mouvements.

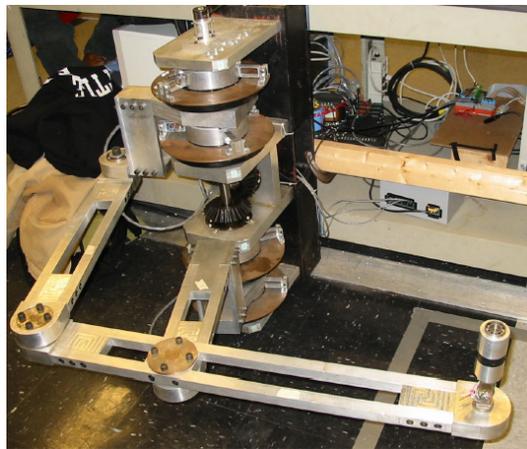


FIG. 1.6 – Système PTER à freins électromagnétiques.

Certains systèmes de retour d'effort dissipatifs utilisent les fluides électrorhéologiques pour contrôler la résistance au mouvement d'un système haptique. Par exemple, le concept d'un gant à retour d'effort passif, utilisant une technologie dissipative a été proposé par Mavroidis et al. [66][71]. Le gant est muni de pistons à chaque jointure des doigts de la main, chaque piston contient un fluide électrorhéologique, dont les propriétés rhéologiques⁵ peuvent être contrôlées grâce à un champ électrique. Les différents pistons raidissent en fonction des propriétés physiques de l'objet manipulé.

1.1.2.4 Illusions haptiques

L'interaction entre les sens humains peut être utilisée pour augmenter la sensation de présence dans les environnements virtuels, comme l'ont étudié Biocca et al. [17]. Les auteurs définissent le concept d'*interaction entre modalités sensorielles*⁶ comme des "*illusions perceptives au cours desquelles les utilisateurs emploient des informations provenant d'une modalité pour pallier les manques dans l'expérience perceptive*". Les auteurs ont étudié comment de telles techniques peuvent améliorer la sensation de présence des utilisateurs dans un environnement virtuel. Certaines peuvent être utilisées pour transmettre à l'utilisateur une information de nature haptique.

Il s'agit de situations où les stimuli d'un canal sensoriel modifient l'interprétation des informations d'un autre canal sensoriel. Par exemple, la situation où une personne juge meilleure sa perception visuelle lorsque la restitution sonore est de meilleure qualité. Dans le monde réel, l'interaction entre deux modalités peut mener à des illusions, par exemple le poids d'un objet est estimé supérieur à un autre de même poids, simplement à cause de son plus grand volume.

Le retour pseudo-haptique tire parti d'une telle interaction entre les sens.

Le retour pseudo-haptique

Le retour pseudo-haptique a été proposé par Lécuyer et al. [57][58]. Les auteurs ont défini les systèmes pseudo-haptiques comme des systèmes permettant de fournir une information haptique générée, augmentée ou modifiée par l'influence d'une autre modalité sensorielle.

Le retour pseudo-haptique a été évalué dans le cadre d'une influence de la modalité visuelle sur la perception des forces appliquées sur un périphérique isométrique. Les auteurs ont montré que le retour pseudo-haptique permet de restituer des informations de raideur sans interface haptique active en se basant sur le couplage d'un retour visuel et de l'action de l'utilisateur sur un périphérique d'entrée passif, mesurant les forces appliquées par l'utilisateur. Les forces de réaction passives résultant des actions de l'utilisateur sur le périphérique d'entrée donnent à l'utilisateur une information de type haptique.

⁵la rhéologie est la science des lois de comportement des matériaux qui lient à un instant donné les contraintes aux déformations (élasticité, plasticité, viscosité)

⁶Nous proposons cette traduction de l'anglais "*Cross Modal interaction*"

Les auteurs ont décrit une expérience montrant qu'il est possible de simuler des ressorts virtuels grâce à cette technique.

Les résultats de l'étude montrent que les sujets ont pu discriminer avec succès les raideurs des ressorts réels et virtuels, dans une certaine limite de perception. Il existe des indicateurs permettant de décrire la perception humaine, deux de ces indicateurs décrits dans la littérature [35] sont le JND et le PSE.

Nous rappelons ici une définition du JND et du PSE :

Le **JND** ou (*Just Noticeable Difference*) est la plus petite variation détectable de l'intensité d'un stimulus.

Le **PSE** ou (*Point of Subjective Equality*) est la valeur du stimulus de comparaison perçue comme égale à la valeur du stimulus de référence. Il peut être exprimé comme un pourcentage de variation par rapport à la valeur de référence, un pourcentage positif est caractéristique d'une sous-évaluation du stimulus de comparaison, un pourcentage négatif, d'une sur-évaluation.

Les auteurs obtiennent un JND de 13.4% en moyenne, pour trois ressorts réels de référence de raideurs différentes.

Une expérience étudiant l'influence de l'information visuelle sur la perception haptique de la raideur a aussi été menée par Srinivasan et al. [85].

Amélioration d'un retour haptique actif par des illusions haptiques

Noma et Miyasato [70] proposent d'utiliser la dominance du sens de la vision sur le sens du toucher dans une application de manipulation coopérative d'objets. Deux utilisateurs manipulent un objet virtuel avec un retour d'effort actif. Les auteurs proposent de renforcer l'information haptique active en modifiant le retour visuel.

Leur objectif est de pallier les limitations intrinsèques du système de retour d'effort utilisé, en particulier la limitation en force maximale qui ne permet pas de retourner une résistance parfaitement rigide. Ainsi, le déplacement visuel de l'objet, ne suit pas exactement les mouvements des deux utilisateurs mais il est modifié afin d'obéir à des lois physiques.

Cette modification du retour visuel est destinée à donner une illusion d'un retour haptique plus cohérent. Le retour visuel modifié est basé sur deux lois physiques : l'équilibre de l'objet par rapport aux actions des deux utilisateurs et les contraintes entre l'objet manipulé et d'autres objets dans la scène.

1.1.2.5 Systèmes mixtes

On peut envisager la combinaison de certaines des techniques précédentes. Citons par exemple un système qui combine les "props" et un système à contraintes rigides contrôlé par ordina-



FIG. 1.7 – Un exemple de système passif mixte, combinant un prop et un système à contraintes rigides contrôlé par ordinateur : le système TOPIT. Un ensemble de boutons réels (props) sont disposés sur un système à rencontre pour simuler les boutons d'un cockpit virtuel

teur, ici, un système à rencontre :

il s'agit d'un système de simulation haptique de cockpit d'avion [1]. Le cockpit est visualisé dans un casque immersif, et un panneau réel comprenant des boutons correspondant aux boutons virtuels est placé dans l'espace de manipulation (voir Figure 1.7). La pression sur un bouton virtuel s'accompagne des sensations haptiques retournées par le bouton réel présent dans l'espace de manipulation. Un système permet de déplacer le panneau de boutons, en temps réel, pour aller à la rencontre de la main de l'utilisateur. Ceci permet d'agrandir l'espace de travail dans lequel s'effectue le retour passif.

1.1.3 Forces internes et externes

Nous distinguons deux types de réactions mécaniques du périphérique : en forces *internes* ou en forces *externes*.

Les forces externes sont des forces provenant d'un système à base fixe, capable de contraindre les mouvements de l'utilisateur par rapport à un référentiel terrestre. Typiquement, les systèmes capables de renvoyer des forces externes sont les bras à retour d'effort, les joysticks à retour d'effort, ou encore le Spidar.

Les forces internes sont des forces provenant, de systèmes dont la base n'est pas fixe, typiquement des systèmes portables. Il s'agit de systèmes pouvant contraindre les mouvements de l'utilisateur par rapport à un référentiel lié à un autre point de son corps. Un exemple de système à forces internes est un gant à retour d'effort qui utilise des actionneurs fixés sur la main, qui agissent sur les doigts sans prendre appui au sol.

Un autre exemple de système haptique à forces internes est un système tenu dans la main permettant de recevoir des forces provenant de molettes proposé par MacLean et al. [63] (voir Figure 1.8).

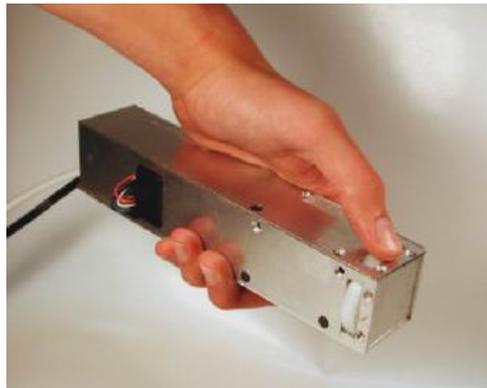


FIG. 1.8 – Système portable de retour d'effort en forces internes [63]

Le HapticGear [68] (Figure 1.9) est un système porté sur le dos, et qui permet de renvoyer des forces à l'utilisateur au niveau d'un stylo, par l'intermédiaire de fils. Les forces sont internes dans la mesure où le système n'est pas à base fixe, mais porté sur le dos de l'utilisateur.



FIG. 1.9 – Un exemple de système portable en forces internes : HapticGear, de l’université de Tokyo, est un système portable dont le support est porté sur le dos, et permet, grâce à des fils, de contraindre les mouvements de l’utilisateur par rapport à un référentiel lié à ce support.

1.2 Manipulation directe en environnements virtuels

1.2.1 Interaction homme-application

L’interaction entre l’homme et l’application de réalité virtuelle est fréquemment représentée comme un cycle dans lequel les actions de l’utilisateur provoquent des réactions du système, et les événements créés par le système provoquent des réactions de l’utilisateur.

Fuchs et al. [12] proposent de représenter cette relation par une boucle “perception, cognition, action” que les auteurs qualifient de principe fondamental de la réalité virtuelle. Une représentation circulaire du cycle d’interaction est proposée par Gilman et al. [36] (Figure 1.10). Le rapport technique proposé par le Groupement d’intérêt SIGCHI [42] décrit également l’interaction homme-application au travers d’un cycle.

1.2.2 Ergonomie

L’ergonomie (ou l’étude des facteurs humains) est la discipline scientifique qui vise la compréhension fondamentale des interactions entre les êtres humains et les autres composantes d’un système, et la mise en oeuvre dans la conception de théories, de principes, de méthodes et de données pertinentes afin d’améliorer l’efficacité globale des systèmes [2].

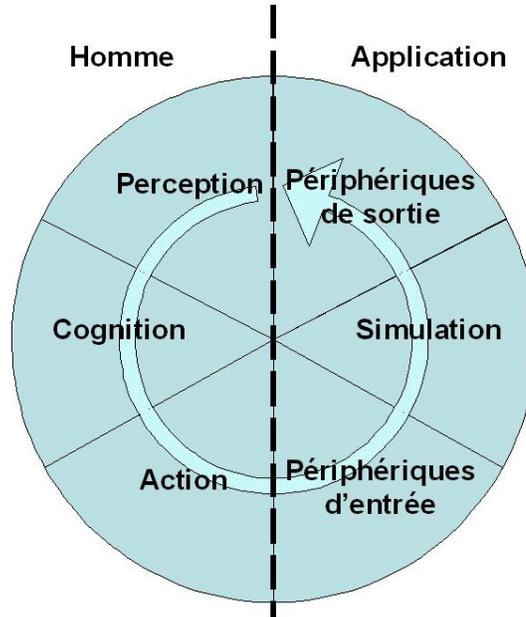


FIG. 1.10 – Cycle d'interaction Homme/Application, d'après Gilman et al.

Les environnements virtuels sont des systèmes interactifs visant à permettre à un ou plusieurs utilisateurs d'interagir en temps réel avec la simulation numérique de scènes tridimensionnelles, au travers de techniques d'interaction faisant appel à des modalités sensorielles diverses (vue, toucher, ouïe, proprioception). Les environnements virtuels peuvent être un outil d'aide pour un domaine d'application, comme l'aide à la conception industrielle, on parle de prototypage virtuel, la simulation médicale ou la formation au geste technique.

La validation et l'évaluation d'environnements virtuels est une étape importante de la conception d'environnements virtuels, elles peuvent permettre de définir l'adéquation d'un système pour une application donnée, de mesurer les limites de l'application au delà desquelles ce système n'est plus adapté aux caractéristiques humaines, et permet de proposer des bases et des principes de développement pour des systèmes futurs. Pour ces raisons, l'évaluation des EV est primordiale.

L'environnement virtuel est basé sur le principe d'une interaction en temps réel entre l'homme et l'application. Les différents éléments qui composent cette interaction sont l'objet des évaluations d'EV. L'étude de la perception sensorielle humaine peut être envisagée dans l'évaluation d'un environnement virtuel. Aussi, l'aspect matériel en environnement virtuel (système de visualisation et autres périphériques d'entrée/sortie) peut faire l'objet d'études ainsi que l'aspect logiciel au travers des méthodes d'interaction.

Dans ce cycle d'interaction homme/application, le retour visuel -au travers des périphériques d'affichage- revêt une importance particulière, car il représente le vecteur principal d'infor-

mations.

1.2.3 Visualisation en EV

Certaines caractéristiques des systèmes immersifs permettent d'améliorer l'immersion et le réalisme de la simulation. Tout d'abord, la vision stéréoscopique permet de percevoir la scène en trois dimensions. Ensuite, le calcul des images en fonction du point de vue de l'utilisateur, que nous appellerons *point de vue dynamique*, qui grâce aux systèmes de suivi de mouvements (tracking) permet à l'utilisateur de voir les différentes parties d'un objet lorsqu'il se déplace autour.

1.2.3.1 Stéréoscopie

Les techniques de rendu stéréoscopique sont largement décrites dans la littérature [12][32]. Les techniques de rendu stéréoscopique utilisent des systèmes actifs ou passifs, dont le principe général est de présenter un point de vue différent de la scène virtuelle à chaque œil. Le cerveau fusionne les deux images, ce qui permet de voir une image unique en trois dimensions.

Sur les systèmes à base de projections sur grand écrans comme le plan de travail virtuel (PTV), le rendu stéréoscopique est effectué en projetant deux images différentes correspondant chacune à un point de vue différent sur la scène. Une des ces images est destinée à l'œil droit, l'autre à l'œil gauche. La perception tridimensionnelle est assurée par le cerveau qui fusionne ces deux images. Il est nécessaire de filtrer ces images, car à l'œil nu ces deux images sont visibles simultanément.

Ceci est réalisé grâce à des lunettes actives ou passives, dont le but est de permettre à chaque œil de voir une seule des deux images affichées à l'écran. Les lunettes actives se basent sur le principe d'une visualisation successive des deux images sur chaque œil. Pour cela, les lunettes actives occultent la visibilité grâce à un système à cristaux liquides et à une synchronisation avec l'affichage. Les lunettes passives sont constituées de deux filtres polarisants, chacun ne laissant passer qu'une polarisation donnée, correspondant aux polarisations différentes des deux images émises par l'écran.

1.2.3.2 Accommodation, convergence

Certaines propriétés du fonctionnement de l'œil humain sont particulièrement importantes dans le cadre de la vision 3D sur des systèmes de visualisation. Ces propriétés influent sur la perception de la distance, ou même sur l'efficacité du rendu stéréoscopique.

L'œil humain effectue deux opérations simultanées : l'accommodation et la convergence. L'accommodation est le phénomène de déformation du cristallin afin que les images soient nettes sur la rétine, la convergence est le déplacement des yeux vers le point visé du regard, lorsque le point visé est proche les yeux "louchent" du fait de la convergence. L'homme a appris à effectuer les deux opérations de manière dépendante l'une de l'autre, et une trop

forte disparité de l'une ou l'autre de ces actions mène à une vision diplopique. La vision diplopique, ou diplopie, est la perception de deux images pour un seul objet.

Les caractéristiques de convergence et d'accommodation sur des objets virtuels sont différentes de celle rencontrées en vision d'objets réel. Sur les systèmes d'affichage stéréoscopiques, l'accommodation des yeux se fait sur la surface d'affichage, alors que la convergence se fait vers l'objet virtuel affiché.

1.2.3.3 Point de vue dynamique

Le point de vue dynamique sur les systèmes immersifs permet de simuler le changement de point de vue de l'utilisateur lorsqu'il se déplace par rapport à la scène. Les mouvements de sa tête sont acquis grâce à un système de suivi de mouvements, et la scène est présentée en fonction de ces mouvements.

Le point de vue de l'utilisateur est créé grâce à :

- une caméra virtuelle, asservie à la position de la tête de l'utilisateur.
- une pyramide de vue, également modifiée lors du déplacement de la tête de l'utilisateur (Figure 1.11). Au temps t_1 (schéma de gauche), la pyramide de vue est symétrique et perpendiculaire à l'écran et à la camera. Au temps $t_2 = t_1 + dt$, l'utilisateur s'est déplacé à gauche. La géométrie de la pyramide de vue est recalculée. La pyramide de vue n'est plus symétrique, ceci permet à l'utilisateur de voir la face gauche du cube qu'il ne voyait pas dans la position initiale.

L'effet sur l'affichage est illustré sur l'exemple d'un cube sur la Figure 1.12, l'utilisateur a déplacé sa tête vers la gauche, le point de vue sur le cube a changé, et la cohérence entre l'espace réel et l'espace virtuel est gardée : la pointe du stylos et la main de l'utilisateur sont toujours au même endroit par rapport au cube.

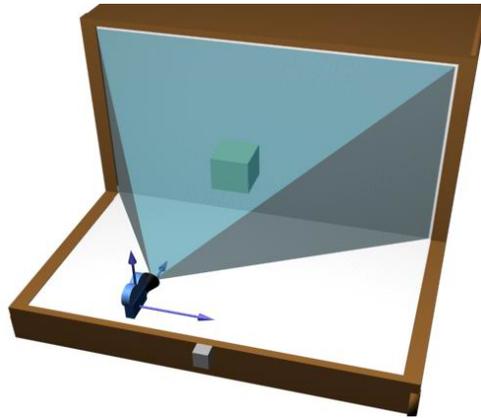
Ceci porte à 4 le nombre de caméras virtuelles, chaque caméra obéit au même principe de calcul de la perspective, avec des propriétés particulières. Les deux caméras associées à un même écran représentent les yeux de l'utilisateur, elles sont donc décalées d'une distance correspondant à la distance interoculaire, et subissent les translations et rotations effectuées par la tête de l'utilisateur.

1.2.3.4 Superposition des espaces réel et virtuel

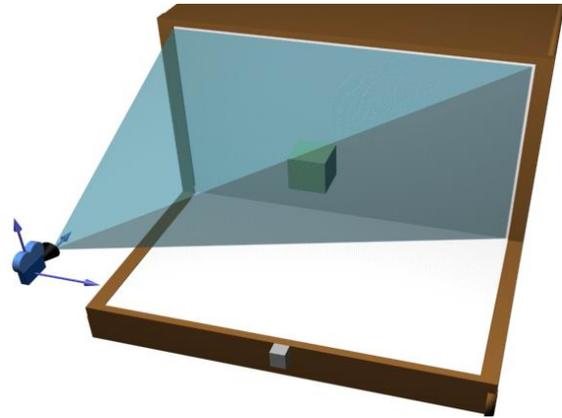
La stéréoscopie et le point de vue dynamique ont pour conséquence de permettre de superposer l'espace réel et l'espace virtuel. Cette propriété est centrale dans notre approche.

L'espace virtuel est celui où sont perçus les objets affichés en trois dimensions.

La superposition de ces deux espaces implique que la perception d'un objet virtuel peut être cohérente avec celle du monde réel. Sur le plan de travail virtuel par exemple, on peut afficher



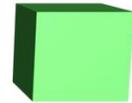
(a) Position initiale de la caméra virtuelle



(b) Position de la caméra après mouvement de l'utilisateur



(c) Vue de la caméra, position initiale



(d) Vue de la caméra, après mouvement de l'utilisateur

FIG. 1.11 – Modification de la pyramide de vue pour le calcul de la perspective en fonction de la position de la tête de l'utilisateur. Pour simplifier, cette Figure ne montre que la pyramide de vue pour l'écran vertical.

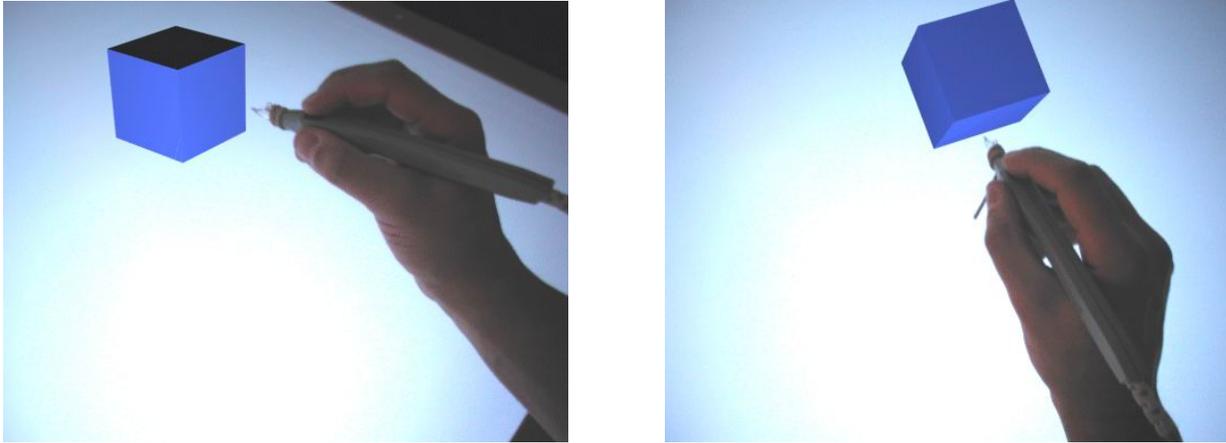


FIG. 1.12 – Le suivi du point de vue est une technique permettant de présenter à l'utilisateur un point de vue dynamique sur l'objet, cohérent avec la position de sa tête. Le schéma présente deux points de vue différents sur un cube virtuel et sur la main correspondant à deux positions distinctes de la tête.

un cube virtuel en un point de l'espace et placer un cube réel de même taille au même endroit. La superposition des espaces réel et virtuel implique que ces deux cubes restent superposés même lorsque l'utilisateur se déplace autour⁷.

1.2.4 Manipulation directe et manipulation à distance

Dans le monde réel, l'action de déplacer un objet se fait en manipulant directement l'objet, c'est à dire en le saisissant directement avec la main et en déplaçant son bras vers le point désiré.

En environnement virtuel, la superposition de l'espace réel et l'espace virtuel proposée par certains systèmes immersifs, permet à l'utilisateur de manipuler les objets virtuels intuitivement, en effectuant des mouvements qui seront reproduits à la même échelle par l'objet manipulé, et dans un espace visuellement cohérent avec son point de vue sur l'espace réel.

Cette superposition des espaces permet la manipulation directe, comme dans le cas réel, en plaçant sa main au plus près de l'objet virtuel manipulé.

Cependant, la superposition de l'espace réel et de l'espace virtuel n'implique pas à elle seule que la main de l'utilisateur manipule directement les objets virtuels, c'est à dire que l'objet

⁷Pour les besoins de cette expérience imaginée, le cube réel devrait être transparent ou être simplement une structure représentant les arêtes du cube, pour ne pas cacher la visibilité du cube virtuel.

virtuel et la main soient co-localisés dans l'espace.

La manipulation avec le rayon virtuel, technique couramment utilisée en environnements virtuels, en est un exemple : l'utilisateur sélectionne et déplace les objets virtuels en manipulant un rayon virtuel qu'il dirige avec sa main. Dans ce cas, l'espace réel et l'espace virtuel sont bien superposés⁸, cependant l'utilisateur peut manipuler l'objet sans avoir sa main directement placée sur celui-ci.

Nous nous plaçons dans le cadre des environnements immersifs permettant une superposition de l'espace réel et l'espace virtuel, et nous proposons de définir pour nos travaux deux modes de manipulation : la manipulation directe et la manipulation à distance.

manipulation directe : c'est un mode de manipulation où la main de l'utilisateur se trouve directement sur l'objet manipulé. La vision stéréoscopique assure la perception de la profondeur et permet de percevoir l'objet près de la main, le point de vue dynamique permet de garder cohérentes la vue sur la main et la vue sur l'objet manipulé lorsque l'utilisateur bouge.

manipulation à distance : c'est un mode de manipulation pour lequel un vecteur constant -en norme et direction- sépare la position de la main de l'utilisateur et celle de l'objet manipulé. La norme de ce vecteur est la distance de manipulation.

1.2.4.1 Distance de manipulation et commande absolue

En manipulation absolue, le déplacement d'un objet virtuel est commandé en position, c'est à dire que les mouvements de l'utilisateur sont reportés sur l'objet virtuel. Dans ce cas, la manipulation directe et à distance sont possibles car la distance entre l'objet et la main de l'utilisateur reste constante au cours du déplacement. En manipulation absolue, la distance entre la main et l'objet est définie à la sélection de l'objet et reste constante tout au long du geste, puisqu'il y'a une correspondance d'échelle entre les environnements réel et virtuel.

1.2.4.2 Distance de manipulation et commande relative

Dans le cas d'un mode de manipulation relatif, le déplacement de l'objet virtuel est commandé en vitesse, grâce à des périphériques isométriques ou élastiques permettant de définir un vecteur vitesse, sans nécessiter de déplacement de la main de l'utilisateur dans l'espace. De ce fait la distance de manipulation est susceptible de varier.

Dans nos travaux, nous étudierons la manipulation directe et à distance principalement en commande absolue. La manipulation directe ou à distance sont cependant envisageables en commande relative car l'utilisateur peut sciemment choisir de déplacer sa main suivant les mouvements de l'objet qu'il commande, même si cette action n'est pas nécessaire.

⁸on pourrait par exemple superposer une longue canne réelle au rayon virtuel

1.2.4.3 Conditions nécessaires pour permettre la manipulation directe

D'une façon générale, quel que soit le système envisagé, les conditions nécessaires à la manipulation directe sont la *stéréoscopie*, le *point de vue dynamique*, asservi au positionnement de la tête, et enfin *l'égalité d'échelle* entre les mouvements de l'utilisateur et les mouvements de l'objet qu'il contrôle avec ces mouvements.

La vision stéréoscopique est nécessaire pour permettre la superposition spatiale des espaces de visualisation et de manipulation. Le point de vue dynamique est nécessaire pour permettre la superposition des espaces quelle que soit le point de vue de l'utilisateur. On peut considérer que la manipulation directe est possible sans le point de vue dynamique. Ceci suppose que la tête de l'utilisateur soit immobile afin que ces yeux restent à l'endroit pour lequel l'image est calculée : c'est une situation peu réaliste dans la mesure où la tête de l'utilisateur bouge naturellement lorsqu'il effectue des tâches.

1.2.5 Systèmes de visualisation en RV

Dans cette section, nous décrivons les principaux systèmes de visualisation en RV et nous étudions la possibilité de manipulation directe pour ces différents systèmes. L'objectif est de situer les différents systèmes de visualisation par rapport au concept de manipulation directe.

Une caractéristique souvent rencontrée dans ces systèmes est la possibilité d'une vision stéréoscopique couvrant une grande partie du champ visuel. On parle pour certains de systèmes immersifs. Le terme "immersion" est ici employé en analogie avec l'acception usuelle de ce mot : le fait d'être plongé dans un liquide. Dans le cas des systèmes immersifs, l'utilisateur est plongé dans l'environnement virtuel.

1.2.5.1 Les casques immersifs

Ce type de dispositif, nommé HMD en anglais pour Head Mounted Displays, se place sur la tête de l'utilisateur, et présente une image devant chaque œil à l'aide d'écrans à tubes cathodiques ou à cristaux liquides pour un rendu stéréo. L'utilisateur ne voit que ce qui est affiché, car le casque et le dispositif d'affichage occultent complètement le monde réel.

Les casques immersifs sont particulièrement adaptés à la manipulation directe, la main de l'utilisateur pouvant se trouver directement sur l'objet manipulé, sans avoir à régler les problèmes d'occlusion du virtuel par le réel, car seule la vision sur le monde virtuel est disponible.

1.2.5.2 Les casques See-Through

Le terme *See-through*, littéralement "voir au travers", désigne des systèmes portés sur la tête permettant de superposer des éléments virtuels à l'image de l'environnement réel, on parle de *réalité augmentée*.

Deux techniques différentes sont utilisées :

- **Technique optique** : Deux miroirs semi-réfléchissants sont placés devant les yeux de l'utilisateur, permettant une vue directe sur le monde réel. Les éléments de la scène virtuelle sont superposés à la vue du monde réel grâce à la projection des images vidéo sur les miroirs, images ainsi réfléchies vers la rétine de l'utilisateur.
- **Technique vidéo** : Deux écrans LCD sont placés devant les yeux de l'utilisateur et occultent totalement la vision directe sur l'environnement réel. L'image captée par une caméra (ou deux pour un système stéréo) au niveau des yeux est reproduite sur les écrans LCD, constituant la vue sur l'environnement réel. Les éléments virtuels de la scène peuvent être introduits dans cette image de l'environnement réel.

Un exemple de manipulation directe en réalité augmentée avec un HMD est le système PIP [88], proposant de superposer un menu virtuel sur une palette réelle (voir Figure 1.13).

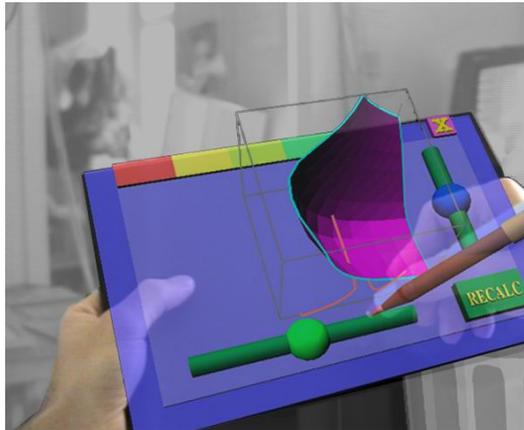


FIG. 1.13 – Système PIP de réalité augmentée

BOOM

Le BOOM (Binocular Omni-Orientation Monitor) reprend le principe d'affichage des casques immersifs, mais au lieu d'être porté sur la tête, il est placé sur un bras mécanique à contrepoids. L'utilisateur regarde dans les oculaires, et peut déplacer physiquement le dispositif pour contrôler son point de vue dans le monde virtuel. Les travaux de Wloka [94] utilisent ce système pour implémenter un outil d'interaction nommé "Virtual Tricorder", ici encore, l'accent est mis sur la superposition des l'espaces réel et virtuel. Le virtual tricorder offrant en plus un retour d'effort passif, du fait de la présence physique de l'objet à l'endroit de sa représentation graphique.

1.2.5.3 Les casques HMPD

Le système HMPD, (Head Mounted Projective Display) [53], est porté sur la tête et permet d'afficher des images sur l'environnement réel de l'utilisateur. La technique consiste à projeter deux images sur deux miroirs semi-réfléchissant placés devant chaque œil de manière à ce que les images se projettent sur des surfaces rétro-réfléctives placées dans la scène réelle. Les surfaces rétro-réfléctives utilisées réfléchissent la lumière dans la direction d'arrivée⁹. C'est une technique qui tend à intégrer l'univers virtuel dans le monde réel de manière modulable, simplement en disposant des surfaces rétro-réfléctives dans l'environnement réel aux endroits désirés.

Par nature, les systèmes de réalité augmentée comme les casques see-through ou les HMPD permettent la superposition de l'espace réel et l'espace virtuel. Cette spécificité en fait des systèmes particulièrement adaptés à la manipulation directe.

Divers travaux sur les systèmes de réalité augmentée montrent un fort intérêt des chercheurs quand à la superposition¹⁰ de l'espace virtuel sur l'espace physique.

La superposition correcte de l'espace virtuel et de l'espace réel est le principal problème posé par ces systèmes si l'on désire permettre une manipulation directe. L'étude de Hua et al. [45] propose des techniques de calibration pour un système HMPD pour permettre une superposition précise entre le monde réel et le monde virtuel.

Un des désavantages des systèmes see-through optiques concerne l'occlusion, la technique d'affichage des éléments virtuels sur l'image optique du monde réel ne permet pas de gérer les cas où la main se trouve devant un objet virtuel (entre l'objet et les yeux de l'utilisateur), l'image virtuelle sera toujours affichée par dessus la main, ce qui est l'inverse de l'effet recherché. Les casques immersifs HMPD permettent de pallier cet inconvénient.

1.2.5.4 Les systèmes à projection sur grands écrans

Ces systèmes proposent une large surface d'affichage, et grâce à l'affichage stéréoscopique offrent un grand volume d'affichage. Un ou plusieurs écrans sont disposés de façon jointive et sont le support d'une projection de la scène virtuelle. Citons parmi ces systèmes quelques exemples principaux :

Le Plan de Travail Virtuel

Le plan de travail virtuel (PTV) [55] est constitué d'un écran horizontal seul ou de deux écrans perpendiculaires, le ou les utilisateurs se tiennent debout devant le dispositif et interagissent

⁹contrairement aux surfaces spéculaires qui réfléchissent l'image selon un angle égal à l'angle d'incidence ou aux surfaces qui diffusent la lumière dans toutes les directions

¹⁰le terme anglais *registering* est le plus souvent utilisé dans la littérature pour désigner le calage de l'espace virtuel sur l'espace physique.

avec les objets virtuels comme si ils étaient posés sur une table, ou flottant au dessus de celle-ci.

Le CAVE

Le CAVE ou Cave Automatic Virtual Environment [25] est constitué de 4 à 6 écrans jointifs, formant un cube de 2 à 3 mètres de côté dans lequel se tient l'utilisateur. Le champ visuel de la personne peut être entièrement couvert, quelle que soit la direction dans laquelle il regarde (dans le cas d'un système à 6 faces). Il garde cependant une certaine visibilité sur son corps, et sur les éventuelles autres personnes présentes, dans la mesure où l'éclairage ambiant, résultant de l'affichage, le permet.

Les systèmes reconfigurables

sont constitués d'une structure modulaire, permettant de placer les écrans selon différentes configurations. Ceux-ci peuvent être mis en ligne (pour proposer une vision panoramique ou accueillir un grand nombre de personnes), ou placés en L ou en U (voir Figure 1.14) afin de s'approcher des solutions comme le CAVE.

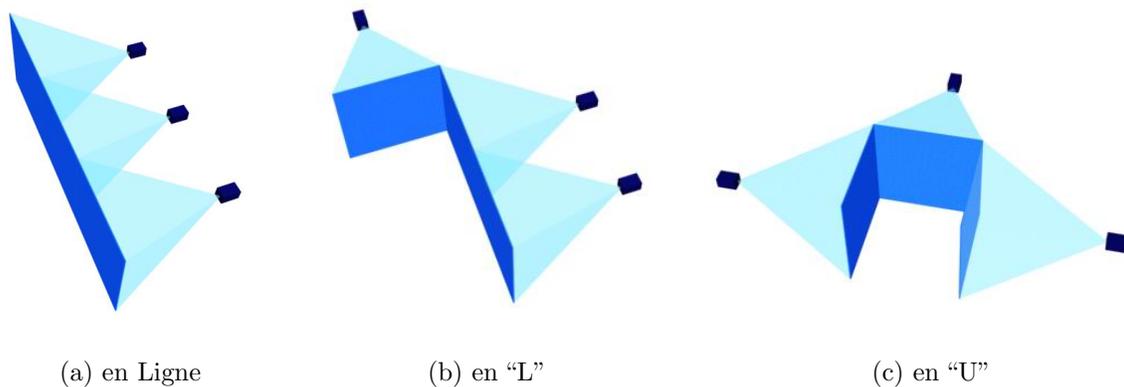


FIG. 1.14 – Trois configurations possibles pour un système immersif reconfigurable à trois écrans

Les environnements à base de projection sur grand écrans du type PTV, CAVE, ou les systèmes reconfigurables, offrant un point de vue dynamique, se prêtent particulièrement à la manipulation directe car leur structure permet à l'utilisateur de plonger son corps dans la scène, techniquement l'espace de manipulation est proche de l'espace de visualisation.

Une technique de manipulation directe sur un plan de travail virtuel est proposée par Coquillart et Wesche [24] il s'agit d'utiliser une tablette transparente dans un système de type plan de travail virtuel : des informations s'affichent directement sur la tablette, et l'utilisateur peut, avec un stylo, interagir directement avec le contenu présenté sur la palette.

Les murs immersifs Il s’agit d’écrans plats ou courbes de plusieurs mètres dotés de plusieurs projecteurs. Ces systèmes sont destinés à accueillir plusieurs personnes, de l’ordre d’une dizaine, et sont souvent installés dans des salles pourvues de plusieurs fauteuils. Il est possible qu’un utilisateur seul y interagisse en manipulation directe, mais la n’est pas la vocation première de ce type de système. En effet, ces systèmes se distinguent principalement des précédents en ce sens que le contenu affiché n’est plus uniquement destiné à un individu (ou un petit groupe de 2-3 personnes), mais à la totalité des personnes présentes, cette moindre individualisation de l’interaction peut impliquer une interactivité moindre du contenu, et un placement plus lointain des utilisateurs par rapport à l’écran.

1.2.5.5 Fish Tank

Le terme “Fish-Tank virtual reality” désigne les systèmes de bureau utilisant un simple écran avec un rendu stéréoscopique et parfois une perspective dynamique dépendant des mouvements de la tête. Le terme “fish tank”, littéralement “aquarium”, fait référence au fait qu’un écran affichant des images 3D ressemble à un aquarium (présence d’une vitre, vision sur un environnement).

Ce type de système d’affichage peut permettre, grâce à l’utilisation d’un miroir, une manipulation directe : un des premiers systèmes Fishtank permettant la correspondance entre l’espace réel l’espace virtuel, offrant une vue stéréo, a été proposé par Schmandt en 1983 [83], cependant le point de vue n’étant pas dynamique, la manipulation est directe que pour une seule position donnée de la tête de l’utilisateur. Son principe, schématisé en Figure 1.15 est de placer l’espace de manipulation sous un miroir, et d’afficher les images virtuelles sur ce miroir à l’aide d’un moniteur placé au dessus. Ainsi, en regardant le miroir, l’utilisateur peut voir et manipuler des objets virtuels situés en dessous.

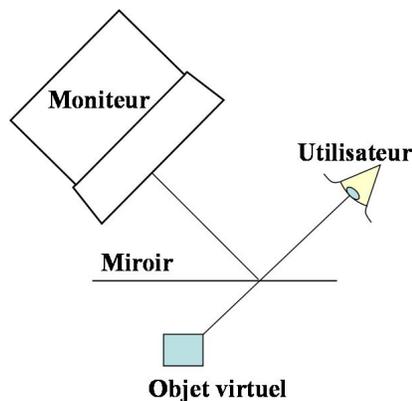


FIG. 1.15 – Schéma Fishtank

L’ajout d’un périphérique de retour d’effort sur ce type de configuration permet de fournir un retour haptique superposé avec le retour visuel, comme le montrent les travaux d’Arsenault et Ware [13]. Un système commercial, le Reachin, propose ce type de configuration avec

retour d'effort (Figure 1.16). Ici encore, les mouvements de la tête de l'utilisateur ne sont pas suivis, et la superposition des deux espaces réel et virtuel n'est effective que pour une position fixe.



(a) Vue globale

(b) Retour visuel, on peut apercevoir la main de l'utilisateur au travers du miroir

FIG. 1.16 – Système Reachin

1.2.5.6 Autres systèmes

Cubby

Le Cubby est un petit système à trois écrans perpendiculaires, avec point de vue dynamique [29][28]. L'auteur définit le concept “What You See is Where You Act” (WYSIWYA) : pour décrire les systèmes pour lesquels la manipulation directe est possible.

WYSIWYF

Le système WYSIWYF (what you see is what you feel) par Yokokohji et al. permet de manipuler haptiquement un objet en ayant une incrustation vidéo de la main sur un écran. [95]. Les auteurs proposent d'interposer un écran vidéo mobile entre la main de l'utilisateur, manipulant un périphérique à retour d'effort, et ses yeux. Sur l'écran est représentée une version virtuelle de la scène et une incrustation vidéo de la main à l'endroit de la préhension. L'objectif de ce système est de permettre à l'utilisateur de voir sa main et ressentir des forces au niveau de l'objet manipulé. Cependant la manipulation n'est pas directe au sens où nous l'avons défini car le système ne propose pas de point de vue dynamique, ni de vision stéréoscopique.

Projection dans l'environnement réel

Une méthode de visualisation, relative à la manipulation directe, est la projection d'images directement sur le monde réel. Il s'agit d'une approche inverse des précédentes : au lieu de chercher à intégrer la main ou le corps de l'utilisateur dans l'EV, on intègre l'EV dans son environnement réel. Les travaux de Raskar [79] proposent ce concept sous le nom de SAR (Spatially Augmented Environment) et étudient comment cette technique peut permettre une interaction naturelle avec l'environnement réel.

1.2.6 Tâches élémentaires

Les tâches élémentaires en Environnement Virtuel considérées par Bowman et al. [22] sont :

- la navigation,
- la sélection et la manipulation,
- le contrôle d'application.

La *navigation* est l'ensemble des actions réalisées par l'utilisateur pour se mouvoir à l'intérieur d'un espace virtuel. Le principal problème consiste à spécifier un déplacement virtuel quelconque sans déplacement physique ou avec un déplacement physique souvent restreint. Il faut aussi noter que le déplacement qui est réalisé dans le monde virtuel peut être plus complexe que son équivalent dans le monde réel du fait entre autres de l'absence de gravité qui autorise des déplacements 3D quelconques.). Le matériel (interface matérielle, environnement virtuel, place disponible) peut contraindre les techniques utilisées. Notons que la navigation comprend une composante motrice, le déplacement, et une composante cognitive dans le cas de la détermination du chemin le plus efficace d'un point à un autre par exemple.

Le *contrôle d'application* est l'action de changer l'état du système ou le mode d'interaction, ou de paramètres comme les propriétés des objets virtuels.

La *sélection* est la désignation d'un ou plusieurs objets dans l'univers virtuel en vue d'une utilisation ultérieure. La manipulation est la modification des propriétés d'un ou plusieurs objets, le plus souvent de la position et de l'orientation, mais il peut s'agir d'autres propriétés (texture, transparence, taille...).

La sélection est une tâche particulièrement importante en Environnements Virtuels car elle introduit la notion de pluralité des objets virtuels¹¹ avec lesquels l'utilisateur peut interagir.

Être capable de choisir un objet parmi une multitude est une action importante dans la plupart des Environnements Virtuels. Une grande partie des applications en EV met en jeu des simulations où le pointage joue un grand rôle.

Les applications de prototypage virtuel par exemple, où l'on peut monter, démonter et positionner différents objets peuvent nécessiter de changer l'objet en cours de manipulation et donc nécessiter plusieurs tâches de sélection. La visualisation scientifique est un autre

¹¹Le terme d'*objet virtuel* est large et peut désigner une représentation graphique d'un objet réel ou encore un outil (bouton, barres de défilement).

type d'application ou la sélection et le pointage peuvent être particulièrement importantes, les actions de choix du type de visualisation, de sauvegarde de données, ou de déplacement de différents objets, comme des plans de coupe, peuvent impliquer la sélection de différents objets graphiques.

Une raison plus stratégique de l'importance des fonctions de sélection est l'intérêt porté aux outils souples, pouvant apporter des solutions à plus d'un problème, ou s'adapter à un nouveau jeu de données. Une méthode d'interaction en EV ne proposant pas de solution de sélection est, à priori, plus une solution particulière à un problème précis, qu'une méthode facilement réutilisable.

La *manipulation* des objets est également importante, une fois l'opération de sélection effectuée, les techniques de manipulation permettent de déplacer et d'orienter les objets, ou d'effectuer des actions comme le montage ou le démontage.

La tâche de sélection et la manipulation en environnement virtuel s'effectuent grâce à une technique d'interaction et un périphérique d'entrée. Nous abordons dans la section suivante les techniques de sélection et de manipulation.

1.2.7 Techniques de Sélection et Manipulation

Le toucher, la préhension et la manipulation d'objets sont les premiers moyens que l'homme utilise pour agir sur son environnement physique. La manipulation d'objets est une action particulièrement intégrée par le cerveau, nous effectuons sans même y penser des gestes complexes comme attraper un objet en mouvement ou le maintenir en équilibre. Dans le monde réel, la préhension d'un objet se fait directement avec la main et tous les sens sont disponibles pour assister le mouvement (en particulier la vue, le toucher et l'ouïe). Dans un environnement virtuel, la perception de l'environnement et les modes d'action sont moins riches et dépendent de nombreux facteurs :

- **les interfaces matérielles utilisées.** Nous n'avons pas la même perception de l'environnement lorsque l'on utilise une simple souris, un capteur électromagnétique, ou un gant de données. D'autre part, la visualisation sur grands écrans, la vision stéréoscopique, le point de vue dynamique contribuent à une meilleure immersion dans l'environnement virtuel et donc influencent la manière d'y agir.
- **le type et le mode de retours sensoriels.** La superposition des espaces virtuel et réel (manipulation directe ou à distance) [74], la simulation en temps réel, la présence de retours sonore et tactile sont autant de facteurs participant à la qualité de la sensation d'immersion.
- **les conditions particulières de l'environnement et de la tâche.** Les objets peuvent se situer à diverses distances de l'utilisateur, notamment hors de portée de la main. La taille (réelle et apparente) et la forme des objets détermine leur facilité de sélection et de manipulation. Le nombre d'objets présents ainsi que la précision requise pour les sélectionner sont des facteurs qui augmentent la complexité de la tâche que l'on désire accomplir.

- **les spécificités des utilisateurs** : niveau d’expérience, capacité d’apprentissage, imagination...

1.2.7.1 Main virtuelle

Naturellement, l’interaction manuelle s’est imposée comme un important moyen de manipulation dans les environnements virtuels. Les méthodes d’interaction dans les environnements virtuels peuvent utiliser différents modes d’action de l’utilisateur : la voix, la direction du regard ou le mouvement d’autres parties du corps, mais l’interaction manuelle directe reste cependant la méthode la plus naturelle et la plus efficace.

La technique de la **Main virtuelle** [18] est utilisée pour sélectionner et déplacer les objets, affichée comme une représentation -ou avatar- de la main réelle, elle reproduit les mouvements de la main de l’utilisateur linéairement et à la même échelle. L’utilisateur peut sélectionner un objet virtuel en superposant la main virtuelle et l’objet visé, un clic sur un bouton de commande ou sur un gant de type pinch-glove permet la confirmation et la tenue de l’objet dans la main.

manipulation directe : La technique de la main virtuelle est particulièrement adaptée à une manipulation directe. Dans le cas des casques totalement immersifs (sans visibilité sur l’environnement réel) la manipulation directe est possible, l’espace réel et l’espace virtuel peuvent être superposés sans se soucier des éventuels problèmes d’occlusion visuelle de la main virtuelle par la main de l’utilisateur. Dans le cas de systèmes d’affichage permettant une visibilité sur l’environnement réel, afficher la main virtuelle à l’endroit de la main réelle peut gêner l’utilisateur pour deux raisons principales :

- la main physique peut cacher tout ou partie de la main virtuelle (ou du curseur virtuel) et rendre difficile son utilisation,
- l’accommodation des yeux de l’utilisateur peut osciller entre la surface d’affichage ¹² et la main réelle, ce qui peut provoquer un inconfort oculaire.

1.2.7.2 Rayon virtuel

Pour pallier la limitation des déplacements de la main virtuelle, la technique du rayon virtuel (“ray-casting”) [18] permet à l’utilisateur de pointer sur les objets à l’aide d’un rayon virtuel, asservi à ses mouvements. Les objets peuvent être sélectionnés à (théoriquement) n’importe quelle distance. C’est une méthode naturelle, qui requiert peu d’efforts. Elle est cependant difficile à utiliser pour la sélection d’objets lointains ou petits, et présente des limitations pour le positionnement (l’utilisation d’un rayon rend fixe la distance de l’utilisateur à l’objet) et la rotation des objets (limitation en degrés de liberté : seules sont possibles les rotations autour de l’axe du rayon et radialement autour de l’utilisateur).

¹²lorsque l’utilisateur regarde un objet virtuel, l’accommodation se fait sur la surface d’affichage et la convergence vers la position de l’objet virtuel dans l’espace, voir Section 1.2.3.2

La rotation des objets virtuels est une tâche souvent problématique pour les techniques à base de rayon virtuel, celles-ci sont intrinsèquement limitées en degrés de liberté. Il en est de même avec la technique de la main virtuelle pour laquelle subsiste une limitation en amplitude de rotation due à la morphologie de la main : on ne peut pas par exemple tourner un objet de 360° avec un seul mouvement de poignet. Poupyrev et al. [77] proposent l'utilisation de rotations 3D non isomorphiques. Il s'agit d'appliquer une correspondance non linéaire et modifiable interactivement entre les mouvements (rotations) de la main de l'utilisateur et les mouvements produits sur l'objet. Cette solution minimise les opérations de "débrayage" (i.e. l'action de relâcher l'objet lorsqu'on est arrivé en limite lors d'un mouvement - limite biomécanique ou limite de l'interface matérielle - pour revenir à une configuration centrale et reprendre l'objet pour continuer le mouvement). Cette méthode étend les capacités de l'interface matérielle mais nécessite un compromis vitesse/précision.

manipulation directe : L'utilité principale de la sélection avec le rayon virtuel est de permettre à l'utilisateur de sélectionner et manipuler des objets qui ne se trouvent pas à portée de main, ou de lui éviter d'effectuer de grands mouvements avec son bras pour atteindre un objet distant. Ceci implique que l'objet sélectionné se trouve sur le rayon, à bonne distance de la main de l'utilisateur, de ce fait, la technique du rayon virtuel met peu l'utilisateur en situation de manipulation directe. Cependant cette technique offre la possibilité de sélectionner les objets en utilisant la base du rayon, donc en le plaçant proche de sa main. Hormis la rotation autour de l'axe du rayon, faire tourner l'objet autour de lui même est difficile avec cette technique, et la sélection avec la base du rayon -en manipulation directe- est la seule solution pour permettre de contrôler efficacement ces deux degrés de liberté en rotation (Voir Figure 1.17).

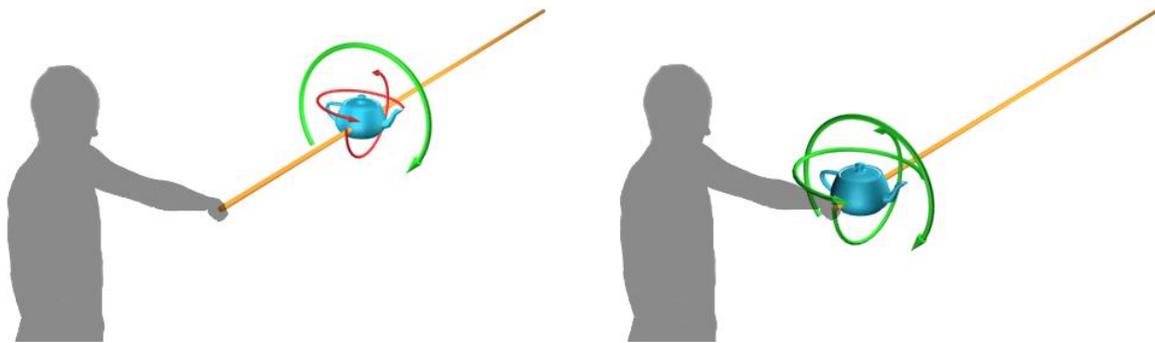
1.2.7.3 Lampe torche virtuelle

Pour faciliter la sélection d'objets lointains, la technique du lancer de rayon a été étendue, l'outil de sélection n'est plus un rayon mais un cône dont le sommet est au niveau de la main de l'utilisateur, rappelant le faisceau d'une lampe torche. Cette technique est nommée "flash light" [59]. Tout objet inclus dans ce volume de sélection est pris en compte. Cette méthode facilite la sélection d'objets lointains ou petits, mais induit des ambiguïtés de sélection pour les objets proches les uns des autres, plusieurs objets pouvant être dans le volume de sélection. De même que le lancer de rayon, elle présente des limitations pour le positionnement et les rotations.

Une extension de la technique précédente permet à l'utilisateur de modifier l'ouverture du cône de sélection en cours de manipulation pour éviter les ambiguïtés dans la sélection. Il s'agit de la technique "aperture" proposée par Forsberg et al. [33].

1.2.7.4 Techniques "image plane"

D'autres méthodes permettent de faciliter la sélection d'objets lointains, hors de portée de main de l'utilisateur. Pierce et al. [50] ont développé une famille de techniques dites "image plane techniques". Leur principe est de réduire la tâche de sélection 3D en une tâche 2D :



(a) à distance (seule la rotation autour de l'axe du rayon est aisée)

(b) en manipulation directe (rotations locales plus faciles)

FIG. 1.17 – Manipulation avec la technique du rayon virtuel. Le centre des rotations que l'utilisateur peut appliquer à l'objet est situé au niveau de son poignet, ceci implique que lorsque l'objet sélectionné est à distance de la main, les rotations de l'objet autour de lui-même sont difficiles, sauf autour de l'axe du rayon virtuel. Lorsque l'utilisateur manipule en direct, ces rotations sont plus faciles

l'utilisateur sélectionne l'objet en pointant sur sa projection. L'objet sélectionné se trouve sur la droite passant par l'œil et le doigt pointé de l'utilisateur (“**sticky finger**”).

La technique “**Head Crusher**” est similaire, la sélection se fait en entourant du pouce et de l'index la projection de l'objet. La sélection est facile et intuitive, mais la modification de la distance à l'objet est difficile, puisque l'on ne contrôle que la projection de l'objet.

manipulation directe : Les techniques “Image plane” ne sont pas à proprement dit des techniques de manipulation directe, dans le sens où la position absolue de la main et des objets n'est pas la même. Cependant, au moment de la sélection, l'utilisateur perçoit l'objet virtuel au niveau de sa main. La sélection se fait donc en direct. Dans cet exemple le concept de manipulation directe facilite une tâche de sélection.

1.2.7.5 Rayon virtuel à distance variable

Pour permettre la modification de l'éloignement de l'objet sélectionné, Bowman et al. [26] ont proposé une technique dérivée de celle du rayon virtuel à laquelle on ajoute une fonctionnalité de “canne à pêche”. Une fois l'objet attrapé, l'utilisateur peut enrouler ou dérouler (à l'aide d'une interface matérielle supplémentaire : souris ou autre) le “fil” pour approcher ou éloigner l'objet le long du rayon. Cette méthode permet le contrôle de la distance à l'objet mais nécessite l'ajout d'une interface matérielle pour gérer la distance.

manipulation directe : Comme pour la technique du rayon virtuel, cette méthode permet le choix de la distance de manipulation. De plus, une fois l’objet sélectionné, cette méthode permet de pallier les inconvénients liés aux rotations décrits au Paragraphe 1.2.7.2, la possibilité de choisir la distance de manipulation permet de choisir le type de rotation que l’on désire faire : manipuler l’objet virtuel près de la main facilite les rotations locales de l’objet, le manipuler à distance, permet de grands déplacements, par des rotations de grand rayon.

1.2.7.6 Go-go

Une technique étendant le rayon d’action de la main de l’utilisateur a été proposée par Poupyrev et al., il s’agit de la technique “**Go-Go**” [47]. Cette technique est semblable à celle de la main virtuelle, avec une fonctionnalité permettant d’étendre le rayon d’action. Cette fonctionnalité est le report des mouvements réels de l’utilisateur sur le curseur (main virtuelle) de manière non-linéaire à partir d’une distance D : lorsque l’utilisateur étend sa main au-delà de cette distance D , le facteur d’échelle de déplacement croît (non-linéairement) au fur et à mesure de la distance. Elle permet une manipulation intuitive et agréable, à 6 degrés de liberté, pour un large ensemble de distances. Il subsiste un problème de précision sur les grandes distances car un petit mouvement de la main réelle se traduit en un grand mouvement du curseur.

manipulation directe : Cette technique ne peut pas s’apparenter à de la manipulation directe, dès lors que l’on se trouve dans la partie non linéaire de la fonction de transfert entre les mouvements de l’utilisateur et les mouvements de l’objet.

1.2.7.7 World in Miniature

La technique du “**World in Miniature**” (WIM) [86] permet d’étendre le rayon d’action de l’utilisateur, celle-ci fournit une réplique miniature de l’environnement virtuel (WIM). L’utilisateur manipule indirectement les objets virtuels en interagissant avec leur représentation dans le WIM. La manipulation directe des objets proches reste possible, ainsi que la manipulation des 6 degrés de liberté des objets quelle que soit leur distance. Une difficulté subsiste pour manipuler les objets de petite taille.

manipulation directe : Il ne peut s’agir de manipulation directe, dès lors que l’utilisateur interagit avec une représentation réduite de l’environnement et qui est de plus affichée de façon décentrée pour permettre de garder la vue principale. Cependant, l’action sur le WIM lui même peut relever de la manipulation directe.

Les techniques d’interaction ne sont pas adaptées à tous les scénarios de manipulation, pour répondre à un plus grand nombre de problèmes, l’idée de combiner plusieurs techniques a été étudiée. Les deux approches les plus significatives exploitant la combinaison de techniques sont l’agrégation de techniques et les techniques hybrides.

1.2.7.8 Agrégation de techniques et techniques hybrides

- **l'agrégation de techniques** : l'utilisateur possède un moyen de choisir explicitement l'une ou l'autre des techniques au cours de la tâche.
- **les techniques hybrides** : lors de la tâche, le système passe d'une technique à l'autre automatiquement et de manière transparente pour l'utilisateur en fonction du contexte de la tâche. L'idée est de fournir à l'utilisateur la technique de manipulation la mieux adaptée.

Comme support aux techniques d'agrégation, un moyen de choix interactif de la technique courante doit être fourni. Parmi les plus connues, citons le Virtual Tricorder [30] qui est une forme de télécommande permettant de choisir parmi différentes techniques d'interaction.

Les deux techniques suivantes sont des **techniques hybrides** qui ont pour objectif de permettre une sélection des objets hors de portée de la main de l'utilisateur, et parallèlement de permettre une manipulation directe, dans la main de l'utilisateur. Notons que les techniques précédentes ne permettent pas de cumuler ces deux avantages.

HOMER : Un premier exemple combine le lancer de rayon et la manipulation directe avec la main virtuelle. Il s'agit de la technique "**HOMER**" (Hand-centered Object Manipulation Extending Ray-casting Technique) [26]. La sélection se fait à l'aide du rayon. A l'issue de la sélection, l'interface passe en mode manipulation : la main virtuelle se trouve automatiquement projetée sur l'objet sélectionné en vue de la manipulation. Un facteur d'échelle K est appliqué au mouvement du curseur. K étant égal à la distance de l'utilisateur à l'objet virtuel divisé par la distance main/utilisateur au moment de la sélection. Ceci permet à l'utilisateur de placer l'objet n'importe où entre lui et sa position initiale. La sélection est facile et permet une manipulation à 6 degrés de liberté sur une large plage de distances. Cependant, le déplacement des objets au-delà de leur distance initiale reste difficile. Par ailleurs, la variabilité du facteur d'échelle au long des sélections (plus l'objet est loin au moment de la sélection, plus le facteur est grand) peut perturber l'utilisateur, et nécessite un temps d'adaptation pour chaque distance.

World scale grab : Une autre solution pour permettre la sélection d'objets lointains et la manipulation directe combine la sélection par la technique "image plane" et le WIM. Avec cette solution appelée "**World scale Grab**" [69]), une fois l'objet sélectionné le monde est réduit autour du point de vue de l'utilisateur à une échelle lui permettant de manipuler l'objet. L'échelle est telle que la taille apparente des objets reste identique (rapprochement des objets compensé par la réduction de taille). Dès que l'utilisateur relâche l'objet, la scène reprend sa taille normale.

Toutes les techniques proposées ont chacune un certain nombre d'avantages mais aussi des défauts. Se pose alors le problème du choix de l'approche à employer. Ces techniques étant récentes, nous ne disposons pas encore d'un recul suffisant et peu d'évaluations ont jusqu'à présent été menées. Poupyrev et al. proposent une évaluation empirique de trois techniques (Go-go, main virtuelle, lancer de rayon) [49]. Ils concluent qu'aucune de ces techniques n'est "meilleure", chacune étant adaptée à une situation de manipulation spécifique. De même les

autres techniques présentées ici sont adaptées à des situations particulières. La combinaison de techniques est une réponse possible à l'apparition de nouvelles contraintes dans les environnements virtuels, cependant la sélection et la manipulation en environnements virtuels restent un problème ouvert.

Chapitre 2

Le retour d'effort pseudo-haptique en couples de forces, une comparaison de deux interfaces : isométrique et élastique.

Le retour pseudo-haptique a été proposé par Lécuyer et al. [58][57], les auteurs ont défini les systèmes pseudo-haptiques comme des systèmes permettant de fournir une information haptique générée, augmentée ou modifiée par l'influence d'une autre modalité sensorielle. Les auteurs ont mené une expérience utilisant l'interaction entre les modalités tactile et visuelle. Les résultats ont montré la capacité du retour pseudo-haptique à simuler la raideur de ressorts en translation.

Nous cherchons à approfondir notre connaissance du retour pseudo-haptique en cherchant à l'étendre à un retour d'effort en couples de forces.

Dans ce chapitre, l'objectif est d'une part de chercher à étendre l'utilisation du retour pseudo-haptique au retour d'effort en couples de forces et d'autre part, de comparer deux types de périphériques d'entrée, isométrique et élastique, pour sa mise en oeuvre. Dans nos travaux, nous utiliserons les définitions suivantes : les périphériques isométriques ne se déplacent pas sous l'action de l'utilisateur et offrent donc une résistance mécanique rigide, les périphériques élastiques se déplacent et offrent une résistance élastique grâce à leur raideur interne.

Nous décrivons une expérience mettant en jeu une tâche de différenciation de ressorts de torsion. Les résultats montrent qu'une information de raideur en torsion est bien simulée, et que les performances des utilisateurs sont différentes entre les deux types de périphériques étudiés. Le périphérique élastique, comparé au périphérique isométrique, permet une meilleure résolution mais cause une plus grande distorsion de perception.

Les résultats sont discutés sur la base des réponses des utilisateurs, du temps de réponse et des couples de forces appliqués sur le périphérique. Ceci nous permet d'étudier la perception

des raideurs virtuelles. On observe que le couple maximal moyen appliqué sur le périphérique ne dépend pas de la raideur simulée, mais reste constant.

Nous formons l'hypothèse que la raideur est estimée grâce à un travail mécanique perçu, basé sur une illusion haptique, et non pas sur un retour de forces effectif proportionnel à la propriété physique simulée.

Introduction

Dans les situations quotidiennes telles que le fait d'ouvrir un bouchon de bouteille ou de tourner une clé dans une serrure, l'information d'effort en torsion est primordiale. Dans le cas de l'ouverture d'une bouteille ou d'un pot, les couples de forces perçus permettent de décider si le bouchon est presque ouvert, ou si, au contraire, il faut tourner avec plus de force pour le dévisser. Lorsque l'on prête attention aux forces en torsion perçues quand on tourne une clef, on se rend compte que celles-ci nous renseignent sur de très fines variations de résistance dues à la progression du mécanisme d'ouverture, et sur l'ouverture de la serrure.

Les situations plus complexes, comme le montage d'un objet dans un autre, impliquent souvent des contraintes de torsion, en plus des forces de translation. Ceci est inhérent à la nature complexe du mouvement humain¹ qui est une composition de translations et de rotations. De ce fait, les forces de réaction d'un objet manipulé, mécaniquement contraint par un système extérieur, comportent souvent des composantes de couples de forces.

Dans un environnement virtuel, par exemple lors de la manipulation d'un objet virtuel, les couples de forces peuvent être calculés dans le but de fournir cette information à l'utilisateur. Plusieurs études, dans des domaines comme la simulation médicale [15] ou les environnements virtuels coopératifs [14][81], ont montré que le retour d'effort est une technique permettant d'améliorer la sensation d'immersion et les performances de manipulation dans un environnement virtuel.

Le retour d'effort en couples de forces existe au travers de systèmes actifs, nous envisageons dans ce chapitre une technique de retour d'effort passif en couples, basée sur le retour pseudo-haptique.

Le retour pseudo-haptique a été proposé par Lécuyer et al., les auteurs ont défini les systèmes pseudo-haptiques comme des systèmes permettant de fournir une information haptique générée, augmentée ou modifiée par l'influence d'une autre modalité sensorielle. Les auteurs ont mené une expérience sur le couplage du retour visuel et de la résistance mécanique interne d'un périphérique d'entrée. Les forces de réaction passives résultant des actions de l'utilisateur sur le périphérique d'entrée donnent à l'utilisateur une information haptique.

Pour permettre une réaction mécanique aux actions de l'utilisateur, le concept de retour pseudo-haptique requiert une résistance mécanique interne du périphérique. A cette fin, deux types de périphériques sont envisageables : *isométrique* ou *élastique*. Un périphérique isométrique ne se déplace pas sous l'action de l'utilisateur et possède donc une raideur interne infinie. Un périphérique élastique se déplace sous l'action de l'utilisateur, et possède une raideur mécanique finie.

L'objectif de l'étude présentée dans ce chapitre est d'évaluer la possibilité de produire un retour d'effort en couples de forces avec une technique pseudo-haptique, et de comparer ces

¹dans ce cas, les mouvements de la main et du bras de l'utilisateur.

deux types de périphériques pour la réalisation et la simulation de ce retour d'effort.

La première partie de ce chapitre présente les travaux de Lécuyer et al. sur le retour d'effort pseudo-haptique.

Puis nous citons les principaux systèmes de retour d'effort permettant un retour d'effort en couples. Nous décrivons ensuite les études relatives aux caractéristiques humaines dans la perception des couples : la résolution en perception des couples est abordée ainsi que les travaux concernant les indices utilisés lors de la perception de forces : le travail mécanique et le déplacement physique.

Le prototype du système de retour d'effort en couples est exposé, (Section 2.3). Le principe de l'évaluation de ce système, basée sur une tâche de discrimination entre des ressorts virtuels et des ressorts réels, est exposé en Section 2.4, nous y présentons les résultats en termes de résolution humaine, en temps de réponse et en couples appliqués sur le périphérique.

Les résultats sont discutés en Section 2.5. Nous analysons en particulier les couples appliqués sur le périphérique, dans la simulation des ressorts virtuels. Les couples appliqués sur le périphérique peuvent nous informer sur la nature du retour d'effort : si le retour d'effort proposé fonctionne, les couples renvoyés à l'utilisateur sont ils proportionnels à la propriété physique simulée, sinon, sur quel critère la discrimination peut-elle se faire ?

2.1 Expériences précédentes sur le retour pseudo-haptique

2.1.1 Simulation de ressorts en compression

Nous avons donné en introduction la définition générale du retour pseudo-haptique proposée par Lécuyer et al. [57].

Dans une première expérience [58] les auteurs ont proposé d'évaluer le retour pseudo-haptique dans le cadre d'une interaction entre le sens de la vue et celui du toucher. L'expérience étudie la possibilité de renvoyer une information de raideur de ressorts en couplant un retour visuel adéquat et l'action de l'utilisateur sur un périphérique isométrique.

L'expérience menée par les auteurs propose de simuler la raideur de ressorts virtuels en compression, en utilisant le modèle du ressort physique basé sur la loi de Hooke 2.1. Les deux éléments de cette simulation sont un périphérique doté d'un piston sur lequel l'utilisateur appuie, et un retour visuel représentant un ressort virtuel dont le déplacement dépend des contraintes appliquées sur le périphérique (Figure 2.1).

$$F_{periph} = k_{virtuel} \cdot x_{virtuel} \quad (2.1)$$

Les utilisateurs appliquent une force F_{periph} sur le périphérique, l'application montre en conséquence un déplacement visuel $x_{virtuel}$, inversement proportionnel à la raideur du ressort $k_{virtuel}$ que l'on désire simuler. L'expérience a montré que les utilisateurs ont été capables de

comparer des raideurs de ressorts virtuels et de ressorts réels. Ceci a montré que le principe permet de simuler une information de raideur, et que celle-ci peut être comparée à une raideur réelle. Les auteurs trouvent un JND² moyen (pour trois ressorts réels) de 13,4% et un PSE de 8,77%.

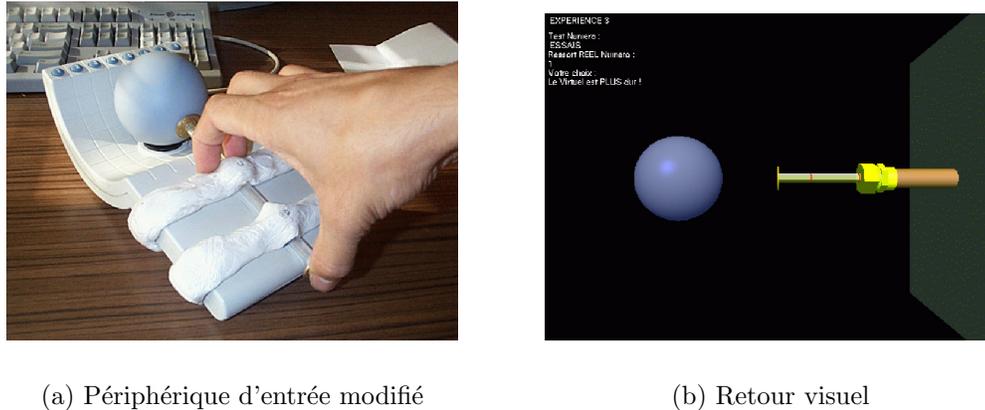


FIG. 2.1 – Simulation de ressorts en compression avec le retour pseudo-haptique par Lécuyer et al. [58]

2.1.2 Limites de l'illusion

L'expérience précédente montre que le retour pseudo-haptique est une forme d'illusion car bien que la raideur physique du périphérique d'entrée soit constante, les utilisateurs semblent percevoir différentes raideurs, grâce à l'influence du retour visuel.

Une seconde expérience a été menée par les auteurs [57], pour évaluer les limites de cette illusion. Dans cette expérience, les sujets ont eu à comparer deux ressorts virtuels, simulés avec un système à retour d'effort PHANTOMTM. Le premier ressort est dit *réaliste* au sens où les déplacements visuel et haptique sont identiques. Tout au long de l'expérience sa raideur était constante. Pour le second ressort (ressort de *comparaison*) des incohérences sont introduites volontairement : celui-ci est plus raide que le premier ressort au niveau haptique, mais parfois moins raide au niveau visuel.

Les auteurs trouvent une moyenne de -24% pour le Point d'Égalisation Subjective (PSE). Le PSE représente ici la valeur du ressort de *comparaison* pour laquelle il semble moins raide que le ressort réaliste même si il est plus raide sur une base haptique. De plus, ce PSE augmente avec la différence de raideur haptique entre les deux ressorts. Plus le ressort de

²voir définition page 32

comparaison est haptiquement plus raide que le ressort réaliste, plus une distorsion de la raideur visuelle est nécessaire pour que les sujets perçoivent les deux ressorts comme égaux.

2.2 Le retour d'effort en couples de forces

2.2.1 Points d'application

Pour retourner un couple de force, au moins deux points d'application sont nécessaires, contrairement au retour d'effort en translation, qui peut s'effectuer de façon ponctuelle, c'est à dire retourner un effort à l'utilisateur en un seul point de son corps. Nous pouvons considérer dès lors, en termes de points d'applications les situations de retour d'effort en couples suivantes :

- Sur deux doigts : réglage du volume sonore sur un potentiomètre.
- Sur plusieurs doigts : ouverture d'un couvercle.
- Sur les doigts et paume de la main : ouverture d'une poignée de porte.
- Sur les deux mains : ouverture d'une vanne à deux mains.
- Sur deux (ou plus) points quelconques du corps

L'étude menée dans ce Chapitre s'intéresse à la situation d'interaction au niveau des doigts.

2.2.2 Systèmes de retour d'effort en couples de forces

Le retour de forces en couples de forces a été proposé sur des périphériques actifs, c'est à dire utilisant des actionneurs contrôlés par un ordinateur, fournissant de l'énergie mécanique à l'utilisateur.

Parmi ceux-ci, certains auteurs proposent un retour d'effort à six degrés de liberté (*d.d.l.*) : citons le PHANTOMTM6 *d.d.l.* [65][10], le delta haptic device [38], le Virtuose 6D [8] ou encore le Freedom6s [9] qui renvoient à l'utilisateur des couples de forces, en plus des efforts en translation (voir Figure 2.2).

Parmi les systèmes non commerciaux, il existe un système à lévitation magnétique offrant un retour d'effort à six *d.d.l.* [16], ou des systèmes dédiés au retour de couples de forces comme le “*hand held torque feedback device*” de Fukui et al. [34], ou un système basé sur les forces gyroscopiques de l'université de Tsukuba : le “*Gyro Moment Haptic Interface*” [7], ou encore le GyroCube, aussi basé sur les forces gyroscopiques [90] (voir Figure 2.3).

Un système portable à base non fixe, à l'instar des systèmes gyroscopiques, permet de percevoir des forces en torsion, le périphérique est maintenu dans les deux mains, lorsque l'utilisateur le déplace afin d'effectuer des actions, le centre de masse du dispositif change en temps réel, et permet un retour en couples de forces par rapport aux deux mains [82].

Ho et al. [44] ont proposé un système haptique à six *d.d.l.* en utilisant deux périphériques de retour d'effort à trois *d.d.l.* L'utilisateur manipule un segment rigide, couplé à deux bras



(a) PHANTOM 1.5/6DOF



(b) Virtuose 6D, ©Haption

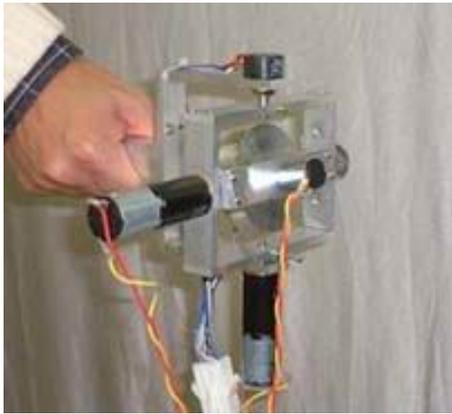


(c) Delta haptic device

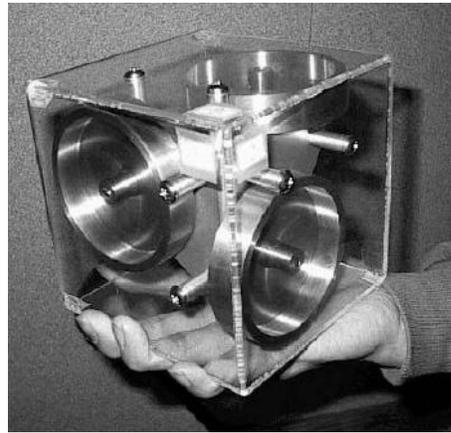


(d) Maglev, système magnétique

FIG. 2.2 – Systèmes de retour d'effort actifs en 6dof/couples de forces



(a) Gyro Moment Haptic Interface



(b) Gyrocube [90]

FIG. 2.3 – Systèmes de retour d'effort gyroscopiques en couples de forces

à retour d'effort PHANTOMTM. Un modèle virtuel du segment réel est utilisé pour interagir avec la scène virtuelle. Par l'intermédiaire du segment réel, couplé aux PHANTOMTM, l'utilisateur peut percevoir des informations de torsion qui ne sont pas disponibles lors d'une interaction avec un seul point de contact.

2.2.3 Perception

Jandura et al. [51] ont mené une expérience pour caractériser les performances humaines dans le cadre de la perception et du contrôle en couple de forces. Ils obtiennent un JND de 12.7% pour un couple de force de référence égal à 60mN·m.

L'expérience de Lécuyer et al. [57] que nous avons décrite précédemment (voir Section 2.1.2, page 61), aborde la question de l'influence de la raideur du périphérique utilisé pour le retour pseudo-haptique. Les auteurs ont montré que l'accroissement de cette raideur entraîne une augmentation de la distortion de perception. Dans ces expériences cependant la raideur du périphérique utilisé est toujours finie. Peut-t'on utiliser un périphérique dont la raideur est infinie, c'est à dire un périphérique rigoureusement isométrique ?

Dans ces travaux nous utiliserons le terme *isométrique* pour les périphériques qui ne bougent rigoureusement pas, tel les capteurs de forces, et qui ont donc une raideur infinie. Nous utiliserons le terme *élastique* pour les périphériques qui permettent un déplacement même faible. Dans nos travaux, et dans le cadre de cette définition, la Spaceball, utilisée dans les travaux de Lécuyer et al. sera considérée comme élastique.

La problématique de l'utilisation des périphériques isométriques ou élastiques a été abordée

dans le cadre de tâches de pointage, comme dans les travaux de Zhai [97]. Les auteurs ont comparé ces deux types de périphériques pour le contrôle relatif du déplacement d'un objet dans une tâche de positionnement.

Par contrôle relatif, on entend un contrôle en vitesse ou en accélération en opposition à un contrôle en position absolue. Dans le cas de leur expérience, le contrôle est effectué en vitesse, c'est à dire que les contraintes appliquées sur le périphérique définissent à chaque instant un vecteur vitesse dans l'espace pour le déplacement de l'objet.

D'après les résultats de l'expérience, l'auteur conclue que le périphérique élastique induit de meilleures performances dans les premières étapes de l'apprentissage, grâce à l'information proprioceptive plus riche permise par ce périphérique. Cependant, après une période d'apprentissage, les utilisateurs montrent des performances égales entre les deux périphériques.

Des travaux de Tan et al. [89] se sont intéressés à la performance dans une tâche de discrimination de compliance (inverse de la raideur), au cours de laquelle les informations de travail mécanique et de force terminale ont été éliminées. Le JND moyen trouvé pour la compliance se situe entre 15% et 99%, ce qui est largement supérieur aux JND habituellement trouvés dans les travaux précédents de comparaison de compliance. Les auteurs concluent que la résolution manuelle de compliance se détériore lorsque les informations de travail mécanique et de force sont éliminées.

Ces résultats sont intéressants pour la comparaison des périphériques élastiques et isométriques, puisque leurs différences mécaniques impliquent des différences dans la nature de l'information de travail mécanique et de force. Les périphériques élastiques, grâce à la présence d'un déplacement lors de la manipulation sont susceptibles de fournir une information de travail mécanique supérieure, le travail mécanique étant le produit de la force appliquée par le déplacement effectué. Cette information n'est pas disponible dans le cas d'un périphérique isométrique.

Ces études peuvent appuyer l'hypothèse que le retour pseudo-haptique peut être simulé plus efficacement avec un périphérique élastique, permettant à l'utilisateur d'avoir plus d'informations proprioceptives ou d'informations de travail mécanique. C'est une hypothèse que nous avons étudié dans l'expérience décrite en [72] et que nous exposons dans la Section 5.3.1.

2.3 Système proposé pour la simulation de ressorts de torsion pseudo-haptiques

Le modèle de ressort virtuel proposé dans l'expérience de Lécuyer et al. est basé sur la loi de Hooke ($F = k \cdot x$), F étant la force réelle mesurée sur le périphérique, x étant le déplacement affiché du ressort visuel.

Nous proposons d'utiliser le même modèle dans le cadre de la simulation de ressorts de torsion, toujours suivant la loi de Hooke, s'écrivant dans ce cas $\Gamma_u = C_v \cdot \theta_v$.

Γ_u est le couple de forces mesuré sur le périphérique, C_v la constante de torsion virtuelle que nous cherchons à simuler, θ_v le déplacement virtuel du ressort simulé.

Nous avons mis en place un système expérimental destiné à simuler des ressorts de torsion avec la technique pseudo-haptique, sur ce modèle de la loi de Hooke. Deux implémentations, isométrique et élastique du périphérique d'entrée ont été mises en place.

Les ressorts virtuels consistent en deux éléments :

- le périphérique d'entrée passif
- le retour visuel

Le périphérique d'entrée est un bouton que l'utilisateur peut tourner à l'aide de ses doigts. Le retour visuel effectué sur un écran représente un bouton de même taille et de même aspect que le bouton du périphérique d'entrée (voir Figure 2.4).

Le comportement visuel du ressort virtuel est calculé à partir de C_v , raideur virtuelle simulée. C_v est simulée sur la base de la loi de Hooke (2.2). Etant donné le couple appliqué par l'utilisateur sur le périphérique d'entrée et la raideur simulée C_v , la simulation place le bouchon virtuel à l'angle θ_v .

$$\Gamma_u = C_v \cdot \theta_v \quad (2.2)$$

Le retour visuel est assuré par un programme utilisant la librairie OpenGL Performer, sur un Pentium III à 800MHz, la fréquence d'affichage est de 50Hz. et se fait sur un moniteur CRT de 21 pouces en vision monoscopique.

Le périphérique d'entrée passif utilise un des boutons, couplé à un capteur de force (système FlexiForceTMELFTM, capteur B101-M). Le capteur Flexiforce est connecté à une station PC, sur laquelle s'exécute l'application visuelle. La nature isométrique ou élastique de ce périphérique d'entrée est une des problématiques de ces travaux.

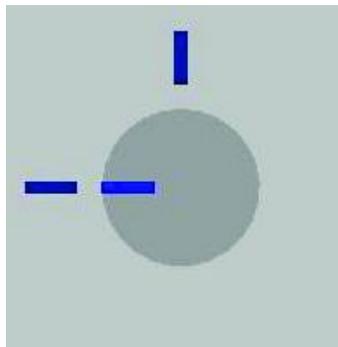


FIG. 2.4 – Retour visuel du ressort de torsion virtuel

2.3.1 Périphérique d'entrée isométrique

Le périphérique d'entrée isométrique est réalisé en utilisant un bouton fixe. Le bouton est relié au capteur de force par l'intermédiaire d'un bras de levier comme le montre la Figure 2.5. Ceci permet, après une phase de calibration, de mesurer les couples de forces appliqués par l'utilisateur grâce à un capteur de forces.

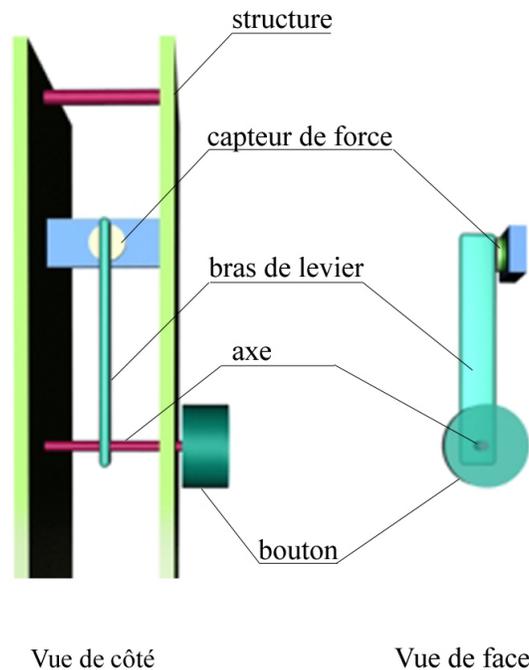


FIG. 2.5 – Mécanisme du périphérique isométrique : Le bouton est immobile et transmet les contraintes appliquées par l'utilisateur à un capteur d'effort par l'intermédiaire d'un bras de levier.

Le terme isométrique signifie que le périphérique ou plus exactement la partie maintenue par un utilisateur, ne bouge pas sous son action. Cependant, la pulpe des doigts de l'utilisateur peut se déformer pendant la manipulation. Cette caractéristique peut être à l'origine d'une illusion de rotation, que nous discuterons dans l'analyse des données. Le périphérique a été calibré avec une erreur maximale de 7%.

2.3.2 Périphérique d'entrée élastique

Le périphérique d'entrée élastique est réalisé en utilisant des ressorts réels reliés à l'axe de rotation du bouton comme le montre la Figure 2.6, le couple de forces est mesuré en plaçant le capteur d'effort afin qu'il soit comprimé lors de la rotation du bouton.

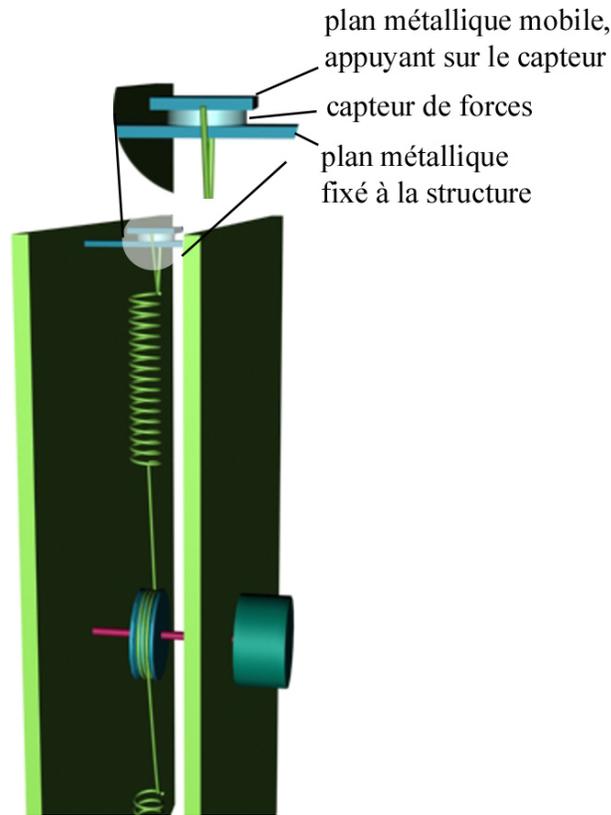


FIG. 2.6 – Mécanisme du périphérique élastique : le comportement élastique du bouton en rotation est réalisé à l'aide d'une poulie fixée sur l'axe de rotation et reliée à deux ressorts travaillant en traction.

Contrairement au périphérique isométrique, la raideur interne du périphérique élastique est finie et a été choisie afin d'être supérieure aux raideurs de chacun des deux ressorts réels. La constante de torsion, mesurée empiriquement est $C = 9.96 \cdot 10^{-2} N \cdot m \cdot rad^{-1}$, le périphérique a été calibré avec une erreur maximale de 6%.

2.4 Evaluation du retour d'effort proposé : comparaison de ressorts réels et virtuels

Pour évaluer le retour d'effort en couples proposé, et comparer les deux types de périphériques, nous avons proposé à un ensemble de sujets une tâche de comparaison de ressorts réels et de ressorts virtuels simulés avec la technique pseudo-haptique.

Nous avons donc mis en place des ressorts de torsion réels. Le dispositif d'entrée utilisé pour les ressorts virtuels, et les ressorts réels ont été intégrés dans un même dispositif physique, montré sur la Figure 2.7



FIG. 2.7 – Système intégrant le périphérique d’entrée pour le retour pseudo-haptique (bouton de gauche) et des ressorts de torsion réels (numérotés 1, 2, 3).

Le sujet peut manipuler les ressorts de torsion en tournant des boutons placés sur le dispositif. Un bouton est utilisé comme périphérique d’entrée -couplé au retour visuel- pour la simulation pseudo-haptique des ressorts virtuels. Un cache³ est placé sur ce bouton du périphérique d’entrée afin de ne pas permettre à l’utilisateur de voir les mouvements et l’inciter à se concentrer sur le retour visuel.

Deux boutons sont dédiés aux ressorts réels. Le prototype présenté en Figure 2.7 comporte un quatrième bouton, correspondant à un ressort réel non utilisé dans l’expérience. Deux groupes de sujets ont effectué une série de tâches de discrimination entre ressorts de torsion réels et ressorts de torsion simulés avec la méthode pseudo-haptique. Pour le premier groupe, le périphérique utilisé était isométrique, pour le second groupe, nous avons utilisé un périphérique élastique.

2.4.1 Ressorts de torsion réels

Deux ressorts de torsion réels ont été utilisés pour l’expérience, numérotés 1 et 2 sur le dispositif. La “constante de torsion” de ces ressorts définit leur comportement mécanique, par souci de simplicité nous utiliserons dans la suite le terme “raideur”.

La personne participant à l’expérience devait estimer la raideur du ressort de torsion en tournant manuellement le bouton autour de son axe, celui-ci offrant une résistance à la rotation. Ceci à été réalisé en plaçant des axes tournants dans la structure du dispositif, au

³ce cache n’est pas visible sur la Figure 2.7, voir Figure 2.9

bout de chaque axe ont été placés des boutons circulaires en plastique, accessibles sur la face avant. Nous avons utilisé des ressorts en translation pour créer une contrainte en rotation sur les boutons manipulés par l'utilisateur. Le mouvement de rotation de chaque bouton est contraint par des ressorts en translation fixés à l'axe tournant grâce à une poulie comme le montre la Figure 2.8.

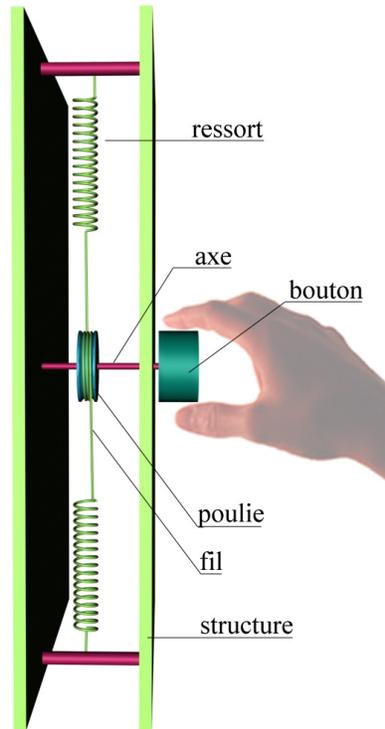


FIG. 2.8 – Mécanisme du ressort de torsion réel

Les boutons sont dotés de rainures pour une bonne prise par les doigts. Les effets de frottement ont été réduits en appliquant un lubrifiant sur les points de contact entre chaque axe et la structure.

La constante de torsion de chacun des ressorts a été mesurée empiriquement. En mesurant le poids nécessaire à la rotation d'un angle donné, étant donné le diamètre du bouton (3,1cm). Les valeurs mesurées des raideurs des deux ressorts réels sont $C1 = 2.0510^{-2} N \cdot m \cdot rad^{-1}$ et $C2 = 3.210^{-2} N \cdot m \cdot rad^{-1}$.

Les raideurs de ces deux ressorts ont été choisies pour représenter deux situations courantes du monde réel : un ressort peu raide (ressort 1) et un ressort moyennement raide (ressort 2). La raideur du ressort 2 a aussi été ajustée lors de séances d'essais préliminaires, afin d'éviter la fatigue.

2.4.2 Procédure

La méthode utilisée pour mener l'expérience est une méthode constante à deux réponses forcées. Nous avons mené l'expérience avec un nombre supérieur de sujets que dans les tests psychophysiques habituels (3-4 sujets), dans le but de tester la capacité du système à retourner une information de force à une variété d'utilisateurs, cependant, pour réduire la fatigue constatée durant des tests préliminaires, nous avons limité le nombre de tests. Les sujets ont chacun répondu à une série de 32 tests de comparaison. Deux ressorts réels ont été utilisés numérotés 1 et 2 sur le dispositif.

La raideur du ressort virtuel présenté est choisie parmi huit valeurs obtenues à partir des variations de -40%, -30%, -20%, -10%, +10%, +20%, +30%, et +40% de la raideur de référence. Chaque paire de comparaison était présentée deux fois, donnant 32 comparaisons en tout (2 répétitions \times 2 ressort réels \times 8 ressorts virtuels). L'ordre d'apparition de chaque comparaison était aléatoire.

2.4.2.1 Facteurs indépendants de l'étude

L'étude concerne trois facteurs indépendants :

1. Le *type de périphérique* isométrique ou élastique,
2. La constante de torsion du *ressort réel*, ou ressort de référence (deux ressorts réels ont été utilisés),
3. La constante de torsion du *ressort virtuel* simulé, ou ressort de comparaison.

2.4.2.2 Conditions de l'expérience

Lors des tests, les sujets étaient assis en face de l'écran, avec le dispositif à portée de leur main dominante. Nous avons porté beaucoup d'attention à ce que chaque ressort soit manipulé avec la même configuration des doigts, du bras et du corps. Le bras des sujets était surélevé afin de leur permettre d'atteindre chaque ressort sans effort.

Pour chaque test, le sujet devait répondre à la question "lequel des deux ressorts vous semble le plus raide?", en appuyant sur la touche correspondant à leur réponse sur un clavier.

Pour assurer un retour visuel correct pour chaque type de ressort, nous avons demandé, tant lors des essais que lors des tests effectifs, que le sujet regarde le retour visuel apparaissant à l'écran lorsqu'il manipule le ressort virtuel, et qu'il regarde le ressort réel lorsqu'il manipule celui-ci.

Une limite de rotation était affichée sur le ressort virtuel présenté à l'écran, à 90° de sa position au repos, figurant la position angulaire au-delà de laquelle le bouchon virtuel ne devait pas se trouver. Ceci, pour éviter une dérive du capteur d'effort, ce qui nécessiterait une recalibration.

Un cache était placé sur le périphérique d'entrée et occultait la vision de la main et du bouton dans le but d'inciter le sujet à regarder le retour visuel affiché à l'écran lors de la manipulation du ressort virtuel. Nous avons demandé aux sujets de commencer chaque nouvelle comparaison en estimant en premier le ressort réel, pour la suite du test, les sujets avaient la possibilité de passer de l'un à l'autre des ressorts -réel ou virtuel- sans restriction.

Aucune information sur l'exactitude des réponses n'était donnée au cours des tests, enfin, pour permettre un apprentissage de la tâche et des modes de réponses, chaque sujet effectuait une série préliminaire de 10 essais de comparaisons, avant de passer aux tests proprement dits.

2.4.3 Sujets

Le groupe ayant participé à l'expérience utilisant le périphérique isométrique était composé de 17 personnes, trois femmes et 14 hommes, âgés de 26 à 53 ans, sans problèmes visuels connus. Deux étaient gauchers et 15 droitiers. Les expériences ont eu lieu lors de l'école d'été Inria/EDF/CEA⁴

Le groupe ayant participé à l'expérience utilisant le périphérique élastique était composé de 17 personnes, deux femmes et quinze hommes, âgés de 25 à 33 ans, tous droitiers, issus du personnel de l'Inria Rocquencourt.

2.4.4 Données recueillies

Les données suivantes ont été recueillies durant les expériences :

- *Réponse* : la réponse à chaque comparaison ressort réel/ressort virtuel a été enregistrée.
- *Couple de forces appliqué* : le couple de forces appliqué sur le périphérique en chaque instant a été enregistré
- *Temps de réponse* : il correspond au temps écoulé entre la présentation des deux ressorts à comparer et la réponse du sujet.
- *Type de stratégie* : à la fin des tests, nous avons demandé à chaque sujet de décrire le cas échéant la stratégie utilisée pour effectuer la comparaison.
- *Déplacement perçu du périphérique* : à la fin des tests chaque sujet devait dessiner l'angle de déplacement estimé du bouton du périphérique d'entrée. Nous avons insisté sur le fait qu'il s'agissait du déplacement physique du périphérique manipulé et non du retour visuel.

2.4.5 Résultats

2.4.5.1 JND, PSE

L'analyse des réponses des utilisateurs suit la méthode classique décrite par Gescheider [35] pour le calcul du JND et du PSE.

⁴Ecole d'été "Visualisation Scientifique Haute Performance et Réalité Virtuelle" du 5 au 8 juin 2002. Les élèves de l'école d'été ont été les sujets de l'expérience, dans le cadre de travaux pratiques intitulés "Evaluation d'un Système à retour d'effort à l'aide de techniques issues de la psychophysique".

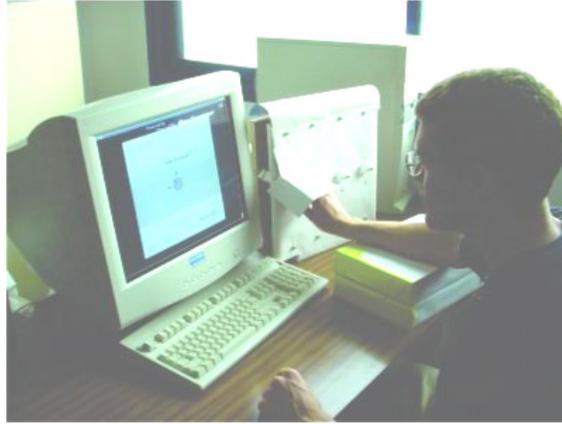


FIG. 2.9 – Sujet en situation de test

Les réponses des sujets ont été cumulées pour tracer une fonction psychométrique pour chaque stimulus de référence (ici, chaque ressort réel de référence). La fonction psychométrique représente la proportion de réponses “le ressort virtuel est le plus raide”, en fonction de la raideur virtuelle de comparaison. Nous faisons l’hypothèse que cette fonction, et donc les réponses des utilisateurs, suit une loi normale de moyenne nulle et d’écart-type 1. Avec cette hypothèse, la transformée normale inverse de cette fonction psychométrique donne une fonction linéaire (voir Figure 2.10).

Les paramètres usuels, le JND et le PSE, sont calculés sur la base d’une régression linéaire (au sens des moindres carrés). La fraction de Weber, est égale au JND divisé par l’intensité du stimulus de référence. Nous assimilons dans ce travail le JND à la fraction de Weber, comme il est fait la plupart du temps dans la littérature.

Le JND sera donné comme un pourcentage de la raideur du ressort de référence. Le PSE est calculé comme la raideur de comparaison pour laquelle la moitié des sujets répond qu’elle est supérieure à la raideur réelle de référence. Pour une raideur virtuelle égale au PSE, 50% des sujets estiment qu’elle est supérieure à la raideur réelle, et 50% estiment qu’elle est inférieure, ces réponses sont interprétées comme aléatoires. Dans ces travaux nous considérons le PSE comme une distorsion subjective de perception exprimé comme un pourcentage de variation par rapport à la valeur réelle de référence. Cependant ceci n’implique pas que nous considérons une correspondance directe entre les valeurs réelles et les valeurs simulées.

Certains sujets ont systématiquement répondu que le ressort virtuel était plus raide; nous appellerons ces sujets “haptiques purs”. La proportion de sujets “haptiques purs” pour le périphérique isométrique était de 2/17, et 6/17 pour le périphérique élastique. Nous avons choisi de ne pas considérer ces sujets dans le calcul du JND et du PSE.

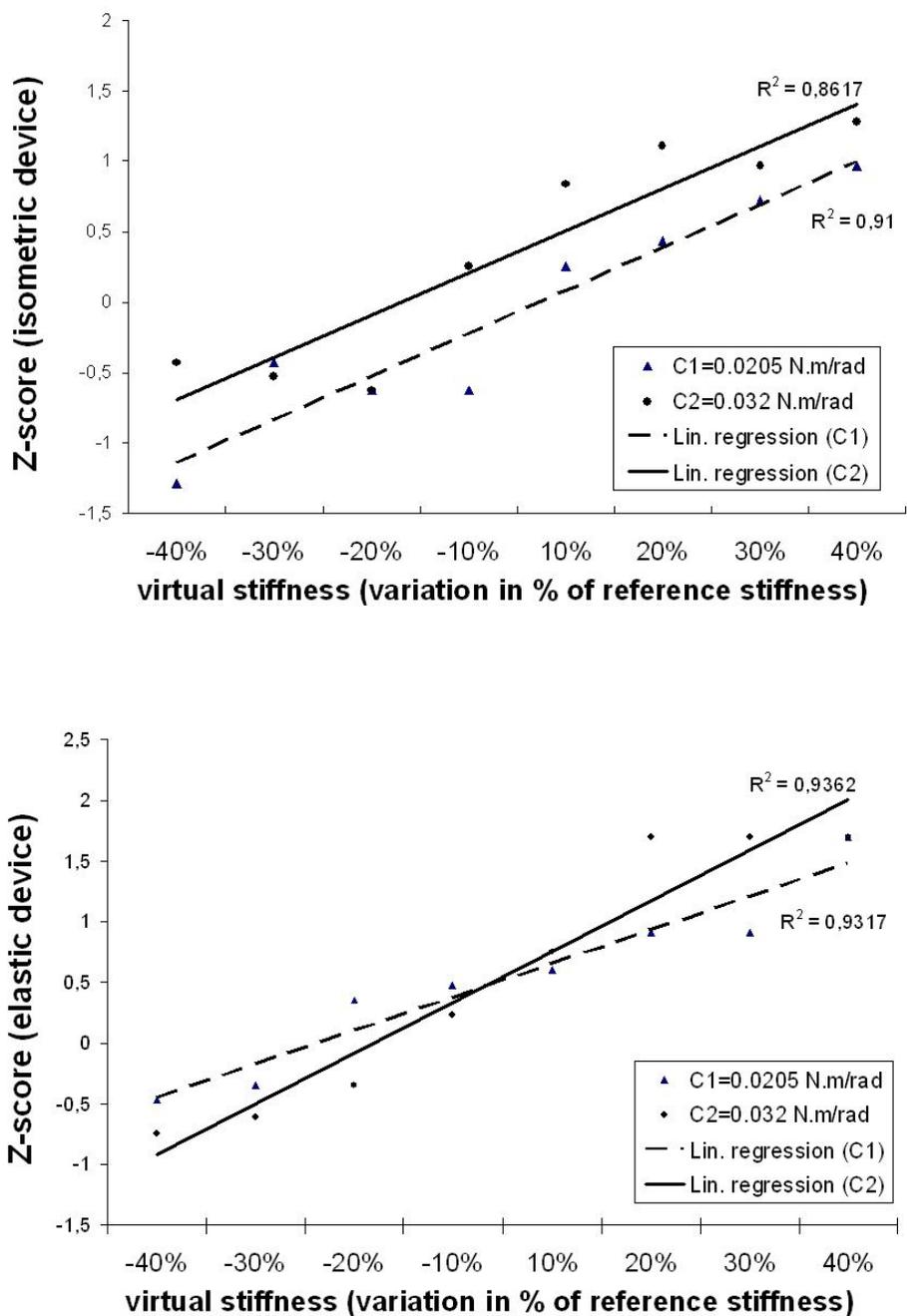


FIG. 2.10 – Transformées normales inverses des fonctions psychométriques]

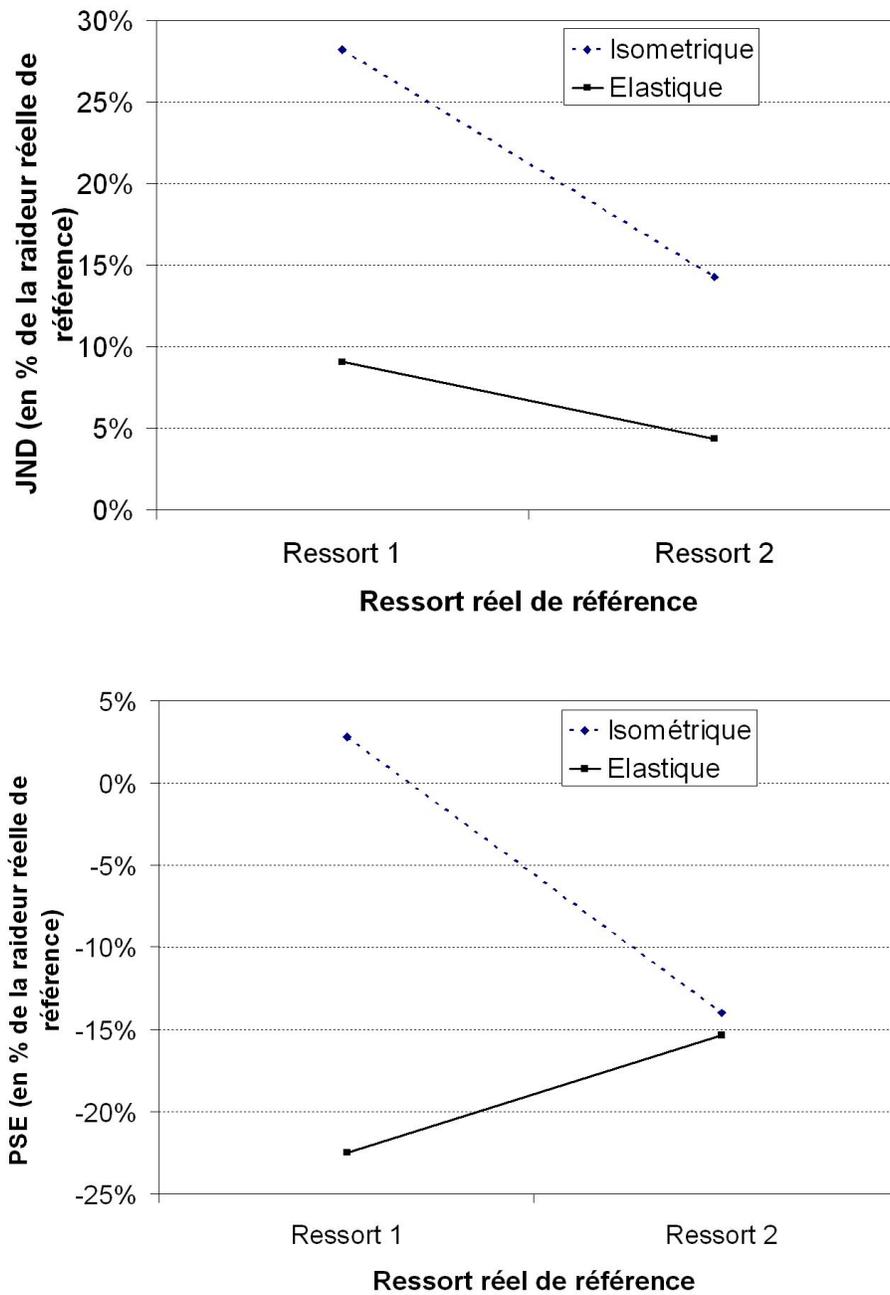


FIG. 2.11 – JND et PSE (*Just Noticeable Differences* et *Point of Subjective Equality*) donnés en pourcentage de la raideur de référence.

La transformation normale inverse de la distribution des réponses des sujets est montrée sur la Figure 2.10. La Figure 2.11 montre les valeurs calculées du JND et du PSE (définis en page 1.1.2.4) pour les deux périphériques. Pour le périphérique isométrique, les JNDs sont 28.2% pour le ressort 1 et 14.2% pour le ressort 2. Les valeurs du PSE pour lesquelles le ressort virtuel est perçu comme égal au ressort réel sont : $PSE_1 = 2.11 \cdot 10^{-2} N \cdot m \cdot rad^{-1}$ pour le ressort 1 et $PSE_2 = 2.75 \cdot 10^{-2} N \cdot m \cdot rad^{-1}$ pour le ressort 2. Ces valeurs de PSE correspondent à des distorsions de perception de +2.8% et -14% par rapport à la valeur du ressort réel de référence (Figure 2.11).

Pour le périphérique élastique, les valeurs du JND sont respectivement 9.1% and 4.4% pour le ressort 1 et 2. Les valeurs du PSE sont $PSE_1 = 1.59 \cdot 10^{-2} N \cdot m \cdot rad^{-1}$ pour le ressort 1 et $PSE_2 = 2.70 \cdot 10^{-2} N \cdot m \cdot rad^{-1}$ pour le ressort 2 (voir Figure 2.11). Nous rappelons les raideurs des ressorts réels : $C1 = 2.05 \cdot 10^{-2} N \cdot m \cdot rad^{-1}$ et $C2 = 3.21 \cdot 10^{-2} N \cdot m \cdot rad^{-1}$. Ces valeurs de PSE correspondent à des distorsions de perception de -22.5% and -15.36% par rapport à la valeur du ressort réel de référence (Figure 2.11).

2.4.5.2 Couple de forces appliqué

La courbe représentant les couples appliqués au cours d'une comparaison présente une succession de pics correspondant chacun à une action de rotation et de relâchement sur le périphérique. Nous avons calculé le nombre de pics constatés sur chaque comparaison réel/virtuel.

Le nombre de pics moyen est de 4.78 ($\sigma=0.83$) pour le périphérique isométrique et de 4.84 ($\sigma=1.41$) pour le périphérique élastique, ce nombre de actions de rotation ne semble pas varier de façon importante suivant le type de périphérique, ni la valeur du ressort de comparaison.

Par contre, l'amplitude des pics, c'est à dire la valeur maximale du couple de forces appliquées semble varier de façon importante suivant le type de périphérique (voir l'analyse de variance au paragraphe 5.4). La Figure 2.12 présente les valeurs moyennes et l'écart-type des pics de couples pour chaque comparaison réel virtuel et chaque type de périphérique.

2.4.5.3 Temps de réponse

La Figure 2.13 présente les temps de réponse pour chaque comparaison réel/virtuel et pour les deux types de périphériques.

2.4.5.4 Illusion de déplacement du périphérique

Pour le périphérique isométrique, 13 personnes ont été sujettes à une illusion de déplacement du périphérique, puisqu'elles ont signalé avoir perçu un déplacement du bouton. Nous insistons sur le fait que les personnes ne pouvaient voir le bouton puisqu'un cache était intentionnellement placé entre l'utilisateur et celui-ci.

La rotation moyenne perçue était de 27.2° ($\sigma=25.6^\circ$)⁵ tous sujets confondus (y compris les

⁵Écart type

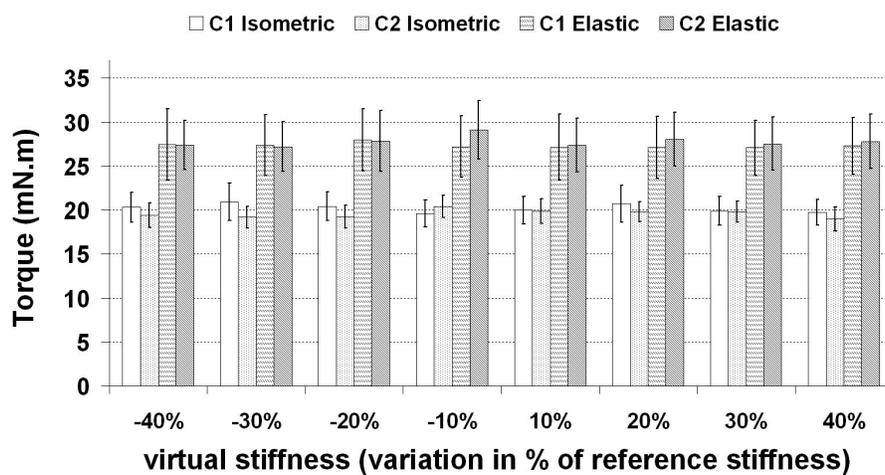


FIG. 2.12 – Moyenne des couples de forces maximaux enregistrés pour chaque comparaison réel/virtuel (avec barres d'écart type).

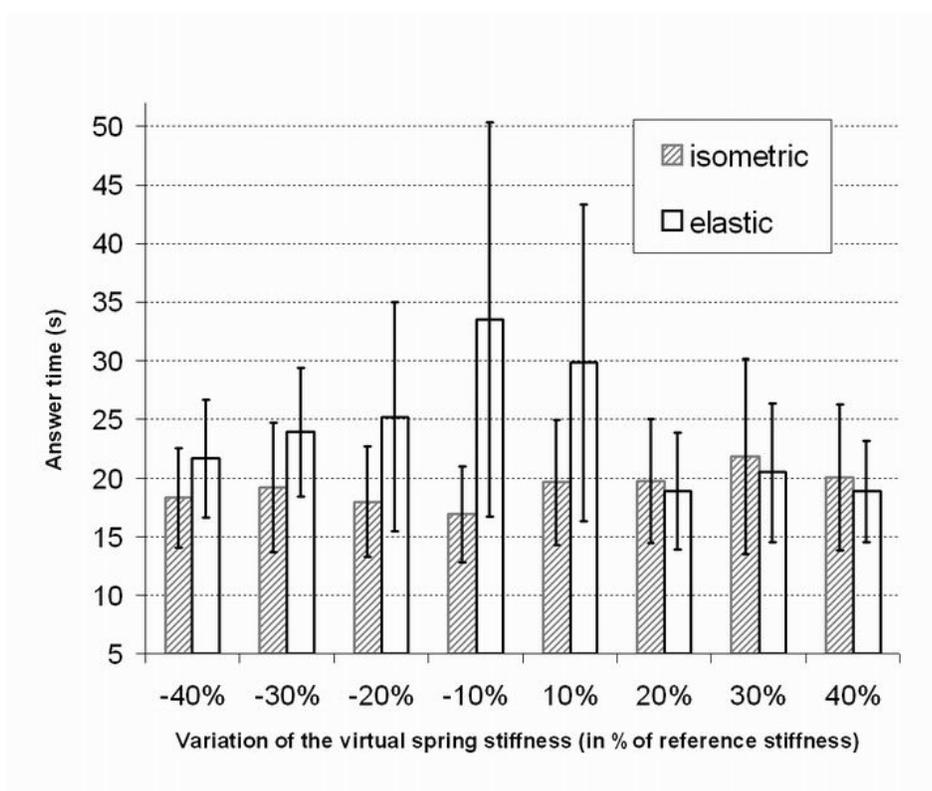


FIG. 2.13 – Temps de réponses en modes isométrique et élastique (avec barres d'écart type).

4 sujets n'ayant pas perçu de déplacement) avec un minimum de 0° et un maximum de 90° .

Pour le groupe de sujets ayant utilisé le périphérique élastique, la rotation moyenne perçue était de 59.3° ($\sigma=17.7^\circ$).

Ceci correspond aussi à une illusion de déplacement car la rotation maximale effective du bouton était de 22° , correspondant à la rotation maximale permise de 90° de la représentation virtuelle du bouton.

2.4.5.5 Type de stratégie

Les sujets ont mentionné 3 types de stratégies :

- une stratégie plutôt "statique", consistant en une comparaison des raideurs en plaçant à un angle fixe chacun des deux types de ressorts,
- une stratégie plutôt "dynamique" consistant en plusieurs actions consécutives sur le périphérique, sans prendre en compte la force finale ou l'angle final,
- et enfin certains sujets ont dit utiliser une combinaison de ces deux stratégies.

Le Tableau 2.1 résume les commentaires de sujets à propos de ces stratégies.

	Stratégie Statique	Stratégie Dynamique	Combinaison de stratégies
Isométrique	11/17 (64,7%)	4/17 (23,5%)	2/17 (11,8%)
Elastique	12/17 (70,6%)	3/17 (17,6%)	2/17 (11,8%)

TAB. 2.1 – Stratégies des utilisateurs proportion de réponses pour chaque type de périphérique (17 sujets par périphérique)

2.5 Discussion des résultats

2.5.1 JND

Les résultats montrent que les utilisateurs ont pu comparer avec succès des couples de forces réels et simulés, avec les deux types de périphériques utilisés.

La performance varie suivant le type de périphérique d'entrée utilisé : les sujets sont plus précis dans la discrimination entre ressorts réels et ressorts virtuels avec le périphérique élastique qu'avec le périphérique isométrique, sur la base des résultats de JND. Nous ne pouvons comparer directement ces JND en raideur à des JND en couple ($12,7\%$) trouvés dans les travaux de Jandura et al. [51].

Les mouvements des doigts et de la main de l'utilisateur sont plus importants avec le périphérique élastique qui tourne lors de la manipulation, qu'avec le périphérique isométrique. Cette caractéristique est susceptible de fournir une information plus importante en ce qui concerne la *proprioception*. Nous pouvons prendre en compte un second type d'information

disponible dans ce mode de manipulation : le *travail mécanique*.

Ces deux types d'information, proprioception et travail mécanique, peuvent expliquer la meilleure performance en termes de JND constatée avec le périphérique élastique. Tan et al. [89] ont trouvé que l'existence d'une information de travail mécanique augmente les performances de discrimination de raideur.

2.5.2 Distorsion subjective de perception

Des résultats en PSE on peut tirer les tendances suivantes :

Distorsion de perception supérieure en élastique Le point d'égalisation subjective (PSE) est supérieur en valeur absolue pour le périphérique élastique par rapport au périphérique isométrique. Le PSE est négatif pour les deux ressorts réels avec le périphérique élastique. Ceci indique que la raideur des ressorts virtuels est surestimée par rapport au ressorts de comparaison, avec le périphérique élastique.

Ce résultat de surestimation des ressorts, qui apparaît pour le périphérique élastique est un résultat d'autant plus surprenant que la raideur physique du périphérique élastique est faible comparée à la raideur infinie (rigidité totale) du périphérique isométrique.

Le périphérique isométrique, malgré sa raideur interne infinie, permet une correspondance plus directe entre les valeurs de raideurs virtuelles et les raideurs réelles.

Les résultats de Lécuyer et al. [57] ont montré, dans le cadre de ressorts pseudo-haptiques en compression, que l'augmentation de la raideur du périphérique d'entrée induisait une augmentation de la distorsion de perception, tendant vers la surestimation des ressorts.

L'expérience décrite dans ce chapitre effectue une comparaison entre un périphérique ayant une raideur finie et un périphérique ayant une raideur infinie. Pour ce dernier cas, le périphérique d'entrée est totalement rigide, les résultats montrent que la distorsion est inférieure.

Dans l'expérience de Lécuyer et al., plus la raideur du périphérique d'entrée est grande, plus la distorsion de perception (donnée par le PSE) est grande.

Ceci suggère que la situation d'un périphérique rigide semble mettre en jeu une stratégie cognitive différente de la part des utilisateurs.

Les couples de forces mesurés peuvent expliquer la surestimation observée avec le périphérique élastique. En effet, les forces maximales (observées en fin de mouvement de rotation sur le périphérique) sont toujours supérieures avec le périphérique élastique qu'avec le périphérique isométrique (voir Figure 2.12).

2.5.3 Couples appliqués

Le couple maximum appliqué sur le périphérique ne semble pas dépendre de la raideur simulée, plus encore, le couple maximal moyen appliqué varie peu, quelle que soit la raideur simulée. Ce résultat montre que le succès de la discrimination ne repose pas sur une information de couple maximal. Le couple maximal appliqué est le couple ressenti à la fin du geste de rotation sur le périphérique.

Différentes stratégies de discrimination sont possibles :

Comparaison à angles égaux Il est possible de comparer les raideurs des ressorts en essayant d'égaliser l'angle de rotation du ressort réel et l'angle du ressort virtuel, et d'estimer les couples terminaux ressentis. Les données en couples montrent que les couples maximaux sont constants sur le périphérique. Il est peu plausible que cette stratégie ait été utilisée au vu des mesures de couples appliqués sur le périphérique : celui est en moyenne constant, quelle que soit la raideur simulée, ce qui indique que l'angle terminal observé par les utilisateurs a varié en fonction des raideurs présentées. Dans l'hypothèse de cette stratégie les utilisateurs auraient adapté l'angle de comparaison pour chaque couple virtuel/réel présenté. Nous n'avons pas observé de tel comportement lors des expériences.

Comparaison à couples égaux Il est possible d'essayer d'appliquer un couple identique sur le ressort virtuel et le ressort réel, et de comparer alors l'angle de rotation. Le ressort (réel ou virtuel) dont le déplacement angulaire est moindre est le plus raide. Cette stratégie est possible, mais nous ne pouvons ni la rejeter ni la confirmer, car nous n'avons pas de données sur les forces appliquées sur les ressorts réels.

Comparaison du travail mécanique réel Sur la base des résultats en couples appliqués, la discrimination ne semble pas provenir d'une information de travail mécanique, celui-ci étant proportionnel au couple maximal appliqué sur le périphérique. Le travail mécanique réel effectué sur les ressorts virtuels est en moyenne constant, il est peu plausible que cette information ait servi à la discrimination.

Hypothèse sur le travail perçu Nous proposons une hypothèse supplémentaire, introduisant un indice que nous appelons "travail mécanique perçu". Ce travail perçu serait le résultat d'une combinaison sensorielle entre le déplacement perçu du périphérique et du couple de forces appliqué au cours du trajet (à l'écran) du bouton virtuel.

2.5.4 Temps de réponse

Nous avons effectué une analyse de variance (ANOVA) sur le temps de réponse.

L'analyse comprend deux facteurs intra-sujet :

- la raideur virtuelle présentée,
 - la raideur de référence,
- et un facteur inter-sujets : le type de périphérique, isométrique ou élastique.

Les résultats montrent un effet non significatif du type de périphérique sur le temps de réponse, ($F(1,24)=3.889$, $p=0.06$) avec une tendance de temps de réponse supérieurs avec le périphérique élastique (moyenne de 24.04s, et 19.21s pour l'isométrique). Il n'y a pas d'effet significatif de la raideur virtuelle présentée, ni de la raideur de référence.

Par contre, les effets croisés des deux facteurs “type de périphérique” et “raideur virtuelle présentée” sont significatifs ($F(7,168)=2,88$ ($p<0.007$)) : le temps de réponse ne semble pas être affecté par la raideur virtuelle présentée pour le périphérique isométrique, mais il l'est dans le cas du périphérique élastique. Plus la différence entre le ressort réel et le ressort virtuel est faible, plus le temps de réponse est long.

Au vu de ces résultats sur le temps de réponse, il semble que la difficulté de la discrimination augmente lorsque cette différence entre la raideur réelle et la raideur virtuelle baisse. Ce phénomène observé pour le périphérique élastique ressemble à la situation réelle, alors que la difficulté semble constante pour le périphérique isométrique. Ceci pourrait être caractéristique d'un retour d'effort plus réaliste avec le périphérique élastique.

2.5.5 Proprioception et illusion haptique

Les participants à l'expérience ont été sujets à des illusions perceptives lors de l'utilisation des deux périphériques. Il est difficile de comparer quantitativement les deux types d'illusions du fait de leur nature différente : dans le cas isométrique, il y'a une illusion de déplacement alors que le système est immobile, alors que pour le périphérique élastique, l'illusion est une surestimation du déplacement réel. Qualitativement, nous pouvons considérer que percevoir un déplacement alors qu'il n'y en a pas est une illusion plus grande.

Les commentaires des utilisateurs sur la stratégie utilisée n'est pas différente selon le type de périphérique d'entrée. Sur la base des enregistrements du couple de forces appliqué sur le périphérique, la stratégie réelle des utilisateurs semble plutôt être une stratégie “dynamique” : on observe en moyenne 5 pics de couple de force sur toutes les comparaisons, avec une durée moyenne de pic (temps resté en situation de pression maximale) de 0.35s ($\sigma=0.075$) pour le périphérique isométrique et 0.81s ($\sigma=0.17$) pour le périphérique élastique.

Ceci renforce l'hypothèse d'une discrimination basée sur un travail mécanique, évalué sur une série d'actions rapides et consécutives sur le périphérique, plutôt qu'une action plus posée consistant à rester longtemps à une position donnée afin d'estimer le couple maximal.

Deux sujets étaient “purement haptiques” lors de l'utilisation du périphérique isométrique, et six pour le périphérique élastique. Il n'est pas possible de conclure quant à la significativité de cette différence, sur la base des résultats actuels, au vu du test du χ^2 ($\chi^2 = 2.615$, non

significatif). Si elle est confirmée, une telle tendance de plus de sujets purement haptiques avec un périphérique élastique pourrait être due à un comportement plus réaliste du ressort virtuel dans le cas élastique, menant à une proportion plus grande de sujets répondant par la réponse “physiquement correcte” que le ressort virtuel est plus dur.

2.6 Perspectives

2.6.1 Intégration en Environnement Immersif

Le retour pseudo-haptique peut être une solution de retour d’effort en environnement immersif, bien qu’il n’ait pas vocation à remplacer le retour d’effort actif, il peut être une solution peu coûteuse pour certaines applications.

La différence fondamentale entre les environnements immersifs (comme les systèmes à projection sur grands écrans) et la station de bureau sur laquelle a été effectuée cette étude est la possibilité de manipuler directement les objets. L’utilisateur peut donc voir sa main sur ou très près de l’objet manipulé. Au contraire, dans les implémentations du retour pseudo-haptique pour la simulation de forces de compression [58] ainsi que pour la simulation de couples de forces décrite dans ce Chapitre, l’utilisateur ne peut avoir simultanément un retour visuel sur l’objet manipulé un retour visuel sur sa main. Celle-ci est physiquement éloignée de l’écran et même, dans le cas de l’expérience décrite dans ce chapitre, intentionnellement cachée afin de ne pas percevoir son déplacement physique.

Le rôle du retour visuel, au travers du contrôle du gain de déplacement de l’objet par rapport aux actions de l’utilisateur, est primordial dans le retour pseudo-haptique. Nous avons vu que le retour pseudo-haptique s’accompagne de phénomènes d’illusion influençant le sens proprioceptif de l’utilisateur, dans une situation où les informations de retour visuel à l’écran et de déplacement physique de la main ne sont pas identiques.

Une solution immersive permettant une manipulation directe serait de proposer une immersion complète dans un casque de réalité virtuelle, dans ce cas le problème de la contradiction entre le retour visuel voulu et les mouvements réels de la main ne se pose plus puisque l’utilisateur ne voit rien du monde réel.

2.6.2 Etude des forces appliquées sur le ressort réel

Les informations de couples et de déplacement sur les ressorts réels, sont des informations qui nous permettrait de mieux comprendre les stratégies de discrimination réel/virtuel. Une expérience intéressante serait de reproduire l’expérience de retour pseudo-haptique en couples, en intégrant un capteur d’effort dans les ressorts réels afin d’effectuer ces mesures.

Cette expérience permettrait d’infirmer ou confirmer l’hypothèse de la stratégie de comparaison des ressorts virtuels et réels à angles égaux envisagée.

Afin de tester notre hypothèse sur le travail perçu, nous pourrions demander aux utilisateurs d'estimer, pour chaque comparaison, l'angle de déplacement qu'ils perçoivent au niveau du périphérique. Cette donnée nous permet de proposer une estimation quantitative du travail perçu (intégration du couple appliqué le long du déplacement perçu). Par ailleurs les données de forces appliquées sur le ressort réel permettent de calculer un travail mécanique réel appliqué sur le ressort réel.

Pour explorer l'hypothèse de l'utilisation d'un travail perçu, nous pourrions comparer ces deux données : premièrement, le travail perçu sur les ressorts virtuels et deuxièmement, le travail mécanique sur les ressort réels.

2.6.3 Applications

Une application que nous pourrions explorer serait la simulation d'un tour virtuel. Le déplacement d'une pièce de bois virtuelle sur le tour se fait à l'aide de manivelles tournantes. Un retour d'effort pseudo-haptique permettrait à un apprenti de percevoir les forces appliquées sur la pièce et de s'entraîner à appliquer les forces adéquates, sans casser la pièce de bois.

Une application plus simple et directement applicable serait d'intégrer un retour pseudo-haptique sur un site internet, proposant par exemple d'interagir avec des boutons de diverses raideur.

Conclusion

Les travaux réalisés dans ce Chapitre ont montré la possibilité de réaliser un retour d'effort en couples de forces grâce à une technique passive existante, le retour pseudo-haptique. L'étude expérimentale, à laquelle ont participé 34 personnes, a montré que les utilisateurs étaient capables de discriminer la raideur de ressorts de torsion virtuels de la raideur de ressorts réels grâce au système proposé. Cependant, une proportion d'utilisateurs n'a pas été influencé par le retour visuel : 2 sujets sur 17 pour le périphérique isométrique, et 6 sujets sur 17 pour le périphérique élastique.

Les résultats de résolution de perception (JND) montrent une meilleure performance lors de l'utilisation du périphérique élastique comparativement au périphérique isométrique. Cependant, le périphérique élastique induit une plus grande distorsion de perception.

Les utilisateurs effectuant la comparaison entre ressorts réels et ressorts virtuels avec succès, nous pouvons nous attendre à ce que la force retournée par le périphérique soit réaliste, au sens où elle est proportionnelle à la propriété physique simulée et permette une discrimination par comparaison sensorielle directe (forces ressenties sur le ressort réel directement comparées à celles retournées par le périphérique). Les résultats montrent que ce n'est pas le cas.

Cette étude amène à la conclusion que les forces terminales, ou pics de forces, correspondant à la force maximale ressentie lors de l'application d'une contrainte en rotation sur le périphérique ne dépendent pas de la raideur simulée. Ceci implique que le travail réel appliqué sur le périphérique est aussi constant, suivant les différentes comparaisons. La comparaison n'est donc faite ni sur la base de forces terminales variant proportionnellement à la raideur simulée, ni sur l'estimation d'un travail mécanique réel.

L'hypothèse d'une stratégie consistant à comparer l'angle de déplacement entre les deux ressorts réel et virtuel en appliquant un couple égal sur chacun est possible, mais nous ne pouvons ni la rejeter ni la confirmer. Pour explorer cette possibilité, les forces appliquées sur les ressorts réels sont des données que l'on peut envisager d'enregistrer lors de travaux futurs mettant en jeu une comparaison entre ressorts réels et ressorts virtuels.

Nous avons également proposé l'hypothèse qu'un travail mécanique *perçu*, basé sur une illusion haptique, a été utilisé par les utilisateurs pour effectuer la tâche de discrimination. Un travail d'étude de l'influence de l'illusion haptique est nécessaire pour vérifier cette hypothèse.

Chapitre 3

Etude de la Distance de Manipulation sur le Plan de Travail Virtuel

Les environnements virtuels immersifs comme le plan de travail virtuel permettent la manipulation directe ou à distance des objets virtuels. Nous avons défini la manipulation directe comme une situation où la main de l'utilisateur et l'objet manipulé sont co-localisés dans l'espace, en manipulation à distance une distance constante sépare la main et l'objet.

Quelle peut-être l'influence de distance de manipulation sur la performance et l'efficacité des utilisateurs lors de l'interaction avec les environnements virtuels, en particulier sur des tâches élémentaires comme la sélection ou le déplacement d'objets? Nous n'avons pas de résultats quantitatifs en ce qui concerne le choix de la distance de manipulation, en particulier sur le plan de travail virtuel. Nous proposons dans ce chapitre d'étudier l'influence de la distance de manipulation sur la performance lors d'une tâche de pointage dans l'espace.

Deux expériences sont présentées dans ce chapitre. La première expérience explore l'influence de la distance de manipulation sur la performance dans une tâche de positionnement 3D. Les résultats indiquent que la manipulation directe et la manipulation à 20 centimètres de distance sont plus efficaces que pour des distances de 40 et 55 centimètres.

La deuxième expérience étudie l'effet de deux facteurs, dans le cadre de la même tâche de positionnement 3D. Premièrement, la présence ou l'absence d'un indice visuel, il s'agit d'un rayon virtuel reliant la main de l'utilisateur et le curseur permettant de manipuler l'objet. Deuxièmement, la valeur du facteur d'échelle entre les mouvements de l'utilisateur et ceux du curseur virtuel qu'il contrôle. Les résultats montrent que les performances d'exécution de la tâche sont significativement moins bonnes en utilisant l'indice visuel, ainsi qu'en utilisant un facteur d'échelle de 1,5.

Introduction

En environnement 2D, il existe des systèmes permettant la manipulation directe¹. Il s'agit d'applications grand public, comme des bornes interactives ou des systèmes pour les graphistes comme les palettes graphiques dont l'affichage s'effectue directement sous la surface sensible (voir Figure 3.1).



FIG. 3.1 – Manipulation directe sur un écran. Avec l'autorisation de Wacom Technology Corp.

Ces exemples de systèmes 2D visent l'intuitivité et l'accessibilité à un grand public grâce à une manipulation directe, celle-ci ne nécessite pas l'apprentissage d'un périphérique. Dans le cas des écrans tactiles les utilisateurs peuvent directement utiliser leur doigt pour sélectionner une icône.

Les systèmes immersifs comme le CAVE, le Plan de Travail Virtuel ou les casques immersifs (HMD) sont des technologies permettant d'interagir avec les mondes 3D. Avec de tels systèmes, comme nous l'avons vu au chapitre 1, l'utilisateur peut avoir une vue stéréoscopique du monde virtuel. Au moyen de systèmes de suivi des mouvements, les images stéréoscopiques peuvent être présentées à l'utilisateur selon un point de vue dynamique, selon son propre point de vue. Dans ces systèmes, l'espace de manipulation et l'espace de visualisation peuvent être superposés et perçus simultanément² de façon cohérente, ou il peuvent être distants. Nous illustrons la distance de manipulation et les deux espaces considérés sur le PTV en Figure 3.2. Nous avons vu au chapitre 1 que la problématique de distance de manipulation se pose en particulier lorsque l'utilisateur contrôle les objets en position, c'est à dire lorsque ses mouvements absolus sont reportés sur un objet ou sur un curseur virtuel. C'est dans ce mode de manipulation que la distance entre la main de l'utilisateur et les objets peut être constante. Nous considérons donc dans ces travaux les situations de manipulation

¹définie au chapitre 1

²Pour les casques immersifs, l'environnement réel n'est cependant pas visible

en commande absolue.

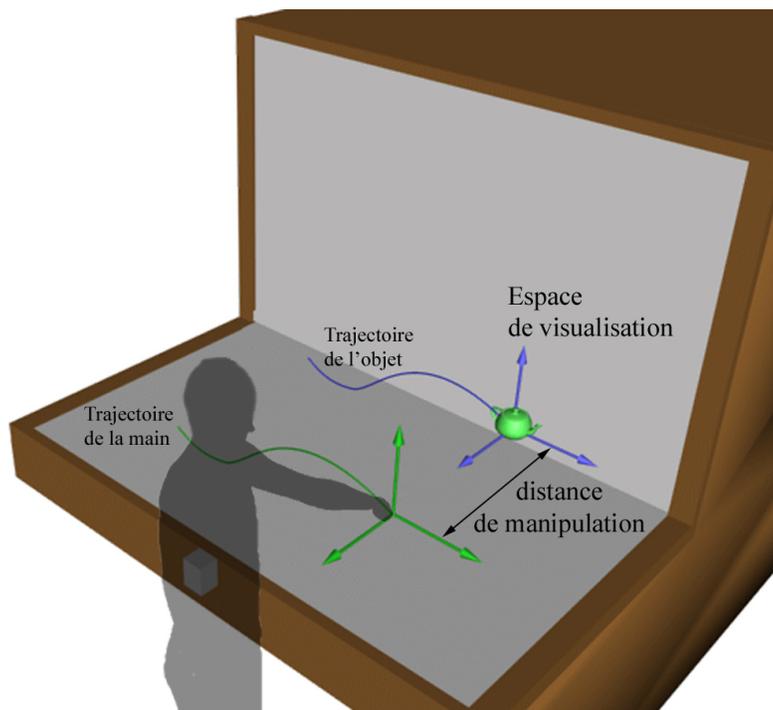


FIG. 3.2 – **Distance de manipulation** : c'est la distance entre l'objet manipulé et la main de l'utilisateur.

La performance et l'efficacité des techniques de manipulation en environnement immersifs est importante. La sélection est une tâche primordiale en environnements virtuels et la distance de manipulation est susceptible d'avoir un effet sur les performances de manipulation et de sélection.

Par ailleurs, dans un domaine encore jeune comme l'interaction en environnements 3D, comment aider les utilisateurs occasionnels ou novices, peu rompus à la manipulation d'objets virtuels, à améliorer leur sensation d'immersion ? Nous nous posons la question si la manipulation directe en environnements immersifs peut être une technique plus intuitive que de se mettre à distance de l'objet.

La manipulation à distance offre-t-elle des avantages ? Est-elle plus confortable pour l'utilisateur ? Cette étude est également motivée par une observation fréquemment faite pendant les démonstrations sur le PTV. Les utilisateurs débutants manipulent souvent les objets à distance plutôt que de plonger leur main au coeur de la scène. Devrions-nous conseiller aux utilisateurs de réduire autant que possible la distance de la manipulation ou non ?

Certaines de ces questions ont été adressées précédemment, mais jamais sur un plan de tra-

vail virtuel. L'extrapolation pour le PTV d'une étude similaire effectuée sur un autre système immersif est difficile, car les résultats sont susceptibles de différer suivant la configuration.

Ce chapitre présente deux expériences relatives à la distance de manipulation. La première expérience étudie l'influence de la distance de manipulation sur une tâche élémentaire en environnement virtuel : la sélection. Nous avons mené une seconde expérience destinée à compléter la première. Nous avons cherché à pousser plus avant l'étude de la manipulation à distance, en évaluant si deux techniques usuelles de manipulation pouvaient améliorer les performances des utilisateurs pour une manipulation à distance. Ces deux techniques sont d'une part l'utilisation d'un rayon virtuel reliant la main de l'utilisateur et le curseur virtuel, d'autre part l'utilisation d'un facteur d'échelle entre les mouvements de l'utilisateur et ceux de l'objet virtuel.

Nous étayons la problématique de distance de manipulation par des observations sur le plan de travail virtuel en Section 3.1, puis nous présentons les travaux relatifs à la distance de manipulation et au pointage en EV en Section 3.2. Les deux expériences sont décrites en Section 3.3 et 3.4.

3.1 Observations sur le Plan de Travail Virtuel

Lors de démonstrations sur le PTV, nous avons pu remarquer que, en grande partie, les utilisateurs utilisent le système en restant éloignés du PTV, comme le montre la Figure 3.3. Certaines manipulations d'objets nécessitent d'amples mouvements, et parfois requièrent une ou plusieurs opérations de "débrayage". Le "débrayage" consiste à mettre le système dans un mode dans lequel les mouvements de l'utilisateur ne sont pas reportés sur l'objet, afin de permettre de replacer sa main et de reprendre le contrôle de l'objet dans une position confortable. Nous considérons ici l'opération de débrayage, car lors de cette opération, les utilisateurs peuvent choisir la distance de manipulation par rapport aux objets virtuels.

Nos observations ont porté notamment sur un démonstrateur de déformation de surface. Dans cette application de démonstration, les utilisateurs effectuent deux opérations principales : la première est la déformation en elle-même, consistant à déformer un plan à l'aide d'une sphère, servant d'outil, la sphère est manipulée à l'aide de la technique du rayon virtuel. La seconde opération consiste à se déplacer autour et à l'intérieur de la forme générée pour apprécier ses contours et l'explorer. Cette opération nécessite de grands mouvements et mène souvent à des positions inconfortables de la main et du bras si le débrayage n'est pas utilisé.

Dans le cas de manipulations nécessitant de grands mouvements, comme par exemple le repositionnement d'un grand objet, ou le déplacement dans une scène de grande taille, le débrayage s'avère utile. Le débrayage permet également de choisir la distance de manipulation. Nous avons observé dans le cas de ce démonstrateur que les personnes ont peu manipulé le modèle de façon directe. Les utilisateurs ont peu utilisé le débrayage pour replacer leur main au cœur de la scène et se mettre dans une situation de manipulation directe. Nous avons

observé en particulier une tendance des utilisateurs à mettre leur bras en arrière de leur torse pour terminer un geste.

Devrions-nous conseiller aux utilisateurs de placer leur main le plus près possible de la scène ?



FIG. 3.3 – Manipulation proche et éloignée sur un Plan de Travail Virtuel

3.2 Travaux précédents

3.2.1 Distance de manipulation

Deux études comparant la manipulation directe et la manipulation à distance ont été proposées, une par Mine [69], une autre par Djajadiningrat et al. [28][29].

L'étude menée par Mine s'intéresse à l'effet de la proprioception sur différentes techniques d'interaction en environnement virtuel, dans le cadre de l'utilisation d'un casque immersif.

Entre autres, l'auteur a mené une étude de manipulation directe, visant à comparer la manipulation des objets lorsqu'ils sont situés près de la main de l'utilisateur, et la manipulation des objets à distance. Les sujets ont eu à effectuer une tâche de positionnement de cubes virtuels dans l'espace. Trois conditions ont été testées :

- manipulation directe (l'objet manipulé est au même endroit que la main)
- manipulation à une distance fixe
- manipulation à une distance variable dépendant de l'extension du bras.

L'analyse statistique montre que la manipulation directe induit des performances significativement meilleures que la manipulation à une distance fixe aussi bien qu'à une distance variable.

L'étude menée par Djajadiningrat et al. [28][29] compare la manipulation directe et la manipulation à une distance de 20 centimètres. L'étude a été menée sur deux systèmes : un système à un écran de type Fishtank, et un système construit par les auteurs nommé "Cubby" . Le

Cubby est un système à rétroprojection avec trois écrans perpendiculaires. Il affiche un point de vue sur la scène calculé en fonction des mouvements de la tête, mais sans vision stéréoscopique.

L'étude a été réalisée sur la base d'une tâche de reconstruction d'un puzzle 3D. L'étude statistique n'a pas montré de différence significative entre les deux modes de manipulation, et ceci sur les deux configurations utilisées. Cependant, les sujets ont manifesté une préférence nette pour la manipulation directe, comparativement à la manipulation à distance de 20 cm, et ceci sur les deux configurations matérielles.

Une étude menée par Poupyrev et al. [76] s'intéresse à évaluer différentes techniques de manipulation en utilisant un casque HMD comme système de visualisation. Deux des techniques utilisées dans cette étude nous intéressent particulièrement car elles sont relatives à la distance de manipulation telle que nous l'étudions dans ce chapitre. Il s'agit de la technique de la "main virtuelle", et de la technique dite "go-go" [47]. La main virtuelle combinée à un système de type casque immersif relève de la manipulation directe puisque la position de la main réelle de l'utilisateur et de la main virtuelle sont les mêmes.

3.2.2 Proprioception, visibilité de la main

Un des paramètres à prendre en compte pour l'efficacité de la manipulation directe est la visibilité de la main. On peut penser qu'attraper et déplacer un objet tout en voyant sa main est une situation différente de la situation où la main n'est pas visible lors du mouvement. La proprioception, c'est à dire la connaissance de la position et de la configuration de son corps, et la vision sont deux sources d'information potentiellement complémentaires, les travaux de Graziano effectués sur des singes [39] ont montré que les deux informations, proprioceptive et visuelle, sont dépendantes en termes de représentation neuronale.

Diverses études sont relatives à la manipulation directe sur des systèmes Fishtank, c'est à dire permettant de manipuler les objets virtuels en ayant une superposition des espaces de manipulation et de visualisation :

Une étude aborde la question de visibilité de la main lors de la manipulation directe d'objets virtuels [64], sur un système de type reach-in, avec point de vue dynamique et vision stéréoscopique. L'étude s'intéresse aux performances lors d'une tâche de saisie de cubes virtuels et souligne l'importance de la visibilité du bras lors de la manipulation. La présence de répliques physiques des cubes virtuels sous le miroir, fournit un retour haptique passif au contact et améliore aussi les performances. Les auteurs proposent de mesurer les performances non seulement en termes de temps de mouvement, mais étudient aussi les courbes de vitesse et d'accélération. La courbe en vitesse classique "en cloche" 3.4, caractéristique des mouvements de déplacement vers une cible observée dans le monde réel, est observée aussi lors de la tâche en réalité augmentée, dans une situation où la main et le cube réel sont visibles, ainsi que le cube virtuel superposé au cube réel. Cependant, les auteurs observent

une modification de cette courbe de vitesse qui comprend des pics multiples lorsque la main n'est plus visible. Ceci correspond à des mouvements correctifs et donc à un temps de parcours plus long. De plus, la forme de la courbe de vitesse (position du pic de vitesse, temps de décélération vers l'objet) dépend de la présence ou non du retour visuel sur la main, ainsi que du retour haptique passif fourni par les cubes réels.

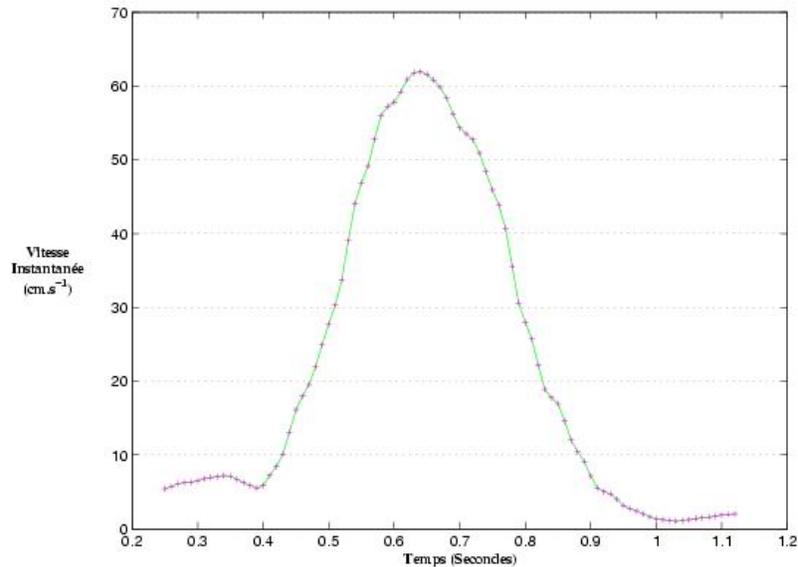


FIG. 3.4 – La courbe de vitesse observée lors des mouvements de la main dans une tâche de déplacement d'un point à une cible dans l'espace a cette forme en cloche, celle-ci est observée aussi dans une tâche identique en environnement virtuel lorsque l'utilisateur voit sa main. La courbe présentée ici est issue des expériences présentées au Chapitre 3

Arsenault et Ware [13] ont effectué une étude sur un système de type fish-tank, avec retour d'effort actif. Le dispositif présenté permet de toucher, grâce à un dispositif de retour d'effort PHANTOMTM, un objet virtuel à l'endroit de l'espace où celui-ci est vu. Le système utilise un point de vue dynamique, changeant suivant les mouvements de la tête de l'utilisateur. Lors de l'expérience, la moitié des sujets étaient en perspective fixe, l'autre moitié devait se déplacer afin d'utiliser le point de vue dynamique. Les auteurs montrent que l'utilisation du point de vue dynamique augmente les performances de 9%. Quant à l'ajout du retour haptique, il augmente les performances de 12%.

Une étude compare le pointage direct d'objets réels et le pointage direct d'objets virtuels sur un système utilisant le principe du fish-tank (manipulation sous un miroir), mais non stéréo. Dans le cas réel, la main et l'objet à atteindre sont visibles. Dans le cas virtuel, l'objet virtuel est affiché à l'écran, ainsi qu'une représentation graphique de la main [37]. L'étude montre qu'il n'y a pas de différence majeure entre les situations réelle et virtuelle sur la phase

initiale du mouvement, mais montre un ralentissement du mouvement pour le cas virtuel sur la partie précision de la trajectoire, notamment sur les petits objets.

3.2.3 Pointage, déplacement

Le pointage est l'action de désigner un objet virtuel ou un point de l'espace. Le pointage en Environnement virtuel est une tâche particulièrement importante puisque elle intervient dans un grand nombre d'actions : partir d'un point de l'espace pour en atteindre un autre peut faire partie d'une action de déplacement d'un objet ou d'un élément de menu, de désignation, de modification de paramètres, de définition d'un espace de sélection...

Dès lors les résultats en performances des utilisateurs au travers d'une tâche de pointage sont d'importants indicateurs pour l'évaluation d'un système de réalité virtuelle. La performance en pointage peut se mesurer en temps de parcours et en précision, la plupart des travaux d'évaluation utilisent ces indicateurs, citons les travaux de Boritz et Booth [20], ou MacKenzie et al. [62]. Ces travaux sont souvent basés sur un modèle robuste du mouvement humain, *la loi de Fitts* [31], qui prédit que le temps d'acquisition d'une cible suit une loi en logarithme du rapport distance à la cible sur taille de la cible.

Pour évaluer les performances lors de tâches de pointage, MacKenzie et al. [61] ont proposé des indicateurs plus précis qui ne portent plus seulement sur la *globalité* du trajet comme le temps de parcours, mais qui se penchent sur des caractéristiques *durant* le mouvement. Les auteurs définissent une trajectoire idéale, la ligne droite entre le point de départ et la cible visée, et définissent des indicateurs décrivant des écarts ou des changements de directions par rapport à cette trajectoire. Ces indicateurs décrivent l'écart à la trajectoire idéale, le fait de rebrousser chemin puis revenir dans la direction correcte, l'erreur correspondant à une entrée dans la surface de la cible suivie d'une sortie et enfin d'une re-rentrée. Les auteurs soulignent que ces indicateurs permettent de comparer plus finement les périphériques de pointage considérés.

3.3 Première expérience : distance de manipulation

Nous avons choisi de faire une expérience mettant en jeu une tâche de pointage d'objets virtuels sur le PTV, pour quatre distance de manipulation différentes : 4 valeurs de distances sont réparties dans une plage de 0cm à 55cm. La borne inférieure (0 cm) s'est imposée d'elle même puisqu'elle représente une condition de manipulation particulière, la manipulation directe. La borne supérieure (55 cm) a été choisie car au delà le confort de manipulation peut être perturbé par les câbles du système de suivi des mouvements.

Dans l'étude de Mine [69], chaque tâche de positionnement effectuée par les sujets se fait à une distance de manipulation aléatoirement choisie entre 10 et 60 centimètres.

Pour nous permettre d'étudier une variation de performance en fonction de la valeur de la distance de manipulation, nous avons choisi 4 valeurs croissantes dans une plage de 0 cm.

à 55 cm. Ceci nous permet de tracer un graphe discret de performances en fonction de la distance, et éventuellement d'extrapoler des valeurs intermédiaires.

Une autre raison pour laquelle nous avons choisi de faire les tests sur des valeurs fixes de distance est de faciliter à l'utilisateur la stabilisation de son comportement pour une distance donnée. *Nous faisons implicitement l'hypothèse qu'il est plus facile de s'habituer à une valeur fixe de la distance plutôt qu'à une distance aléatoirement choisie pour chaque tâche*, comme c'est le cas dans l'étude de Mine.

3.3.1 Contrôle de la distance de manipulation

Pour interagir avec l'environnement virtuel proposé dans l'expérience, l'utilisateur contrôle un curseur virtuel par les mouvements de sa main. Pour cela, il tient en main un dispositif de suivi de mouvements en forme de stylo (Pohlemus Stylus).

La distance de manipulation est définie par la distance entre la main de l'utilisateur et le curseur virtuel. Pour la manipulation directe, le curseur est affiché au plus près de la main de l'utilisateur. Pour éviter l'occlusion par la main ou le stylo, la position la plus proche est le bout du stylo. Pour les autres distances de manipulation, le curseur est affiché à la distance désirée du bout du stylo (voir Figure 3.5)

3.3.2 Tâche de pointage

Chaque personne ayant participé à l'expérience a accompli un ensemble de tâches de pointage sur des objets dans l'espace 3D du PTV. L'expérience est menée sur un Plan de Travail Virtuel à deux écrans (TAN HolobenchTM) avec une résolution de 1280×1024 pour chaque écran, une fréquence de balayage vertical de 96Hz et des lunettes stéréoscopiques CrystalEyesTM pour la vision stéréoscopique.

La tâche de pointage consiste à parcourir le chemin entre une boule virtuelle de départ et une boule d'arrivée (cible), matérialisées par des boules virtuelles de couleurs différentes. Les instants de départ et d'arrivée sont définis par l'action de sélection de l'utilisateur.

Pour effectuer la tâche, l'utilisateur se tient devant le PTV et tient un stylo (Polhemus Fastrak Stylus, avec un bouton) dans sa main dominante. Les mouvements du stylo contrôlent un curseur virtuel en forme de croix (voir Figure 3.6).

La sélection consiste à faire coïncider le curseur et la boule puis à appuyer sur le bouton du stylo. La sélection est valide à l'intérieur du volume de la boule, par conséquent, une marge d'erreur est permise autour du point visé, égale au rayon de la boule. Nommons boule de départ le volume de départ et boule cible le volume d'arrivée.

La boule de départ apparaît toujours au même endroit dans l'espace, en un point situé 40 centimètres au-dessus du centre de l'écran horizontal du plan de travail virtuel.

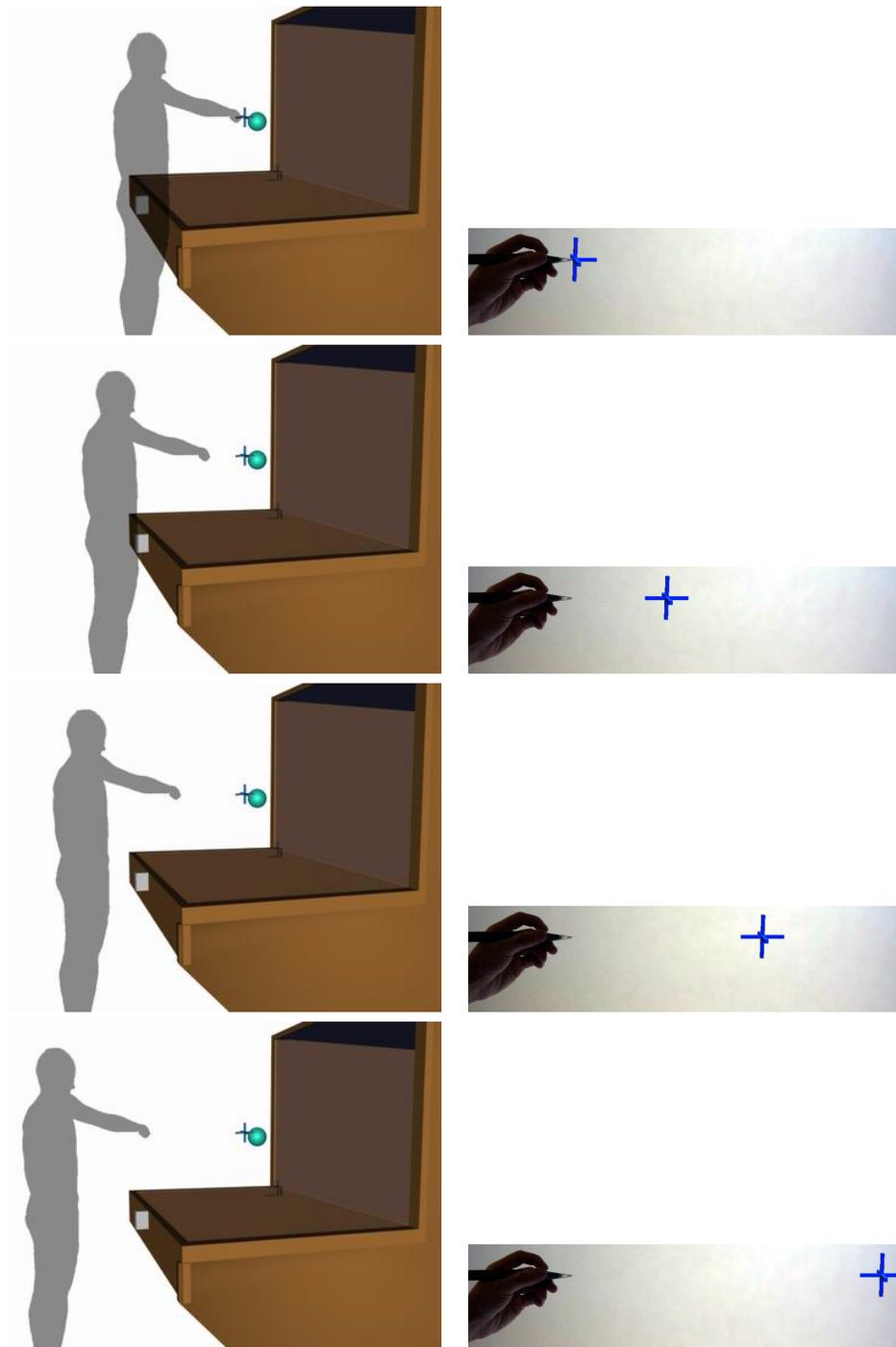


FIG. 3.5 – Vues de la main de l'utilisateur et du curseur à quatre distances de manipulation : 0cm (ou manipulation directe), 20cm, 40cm et 55cm.

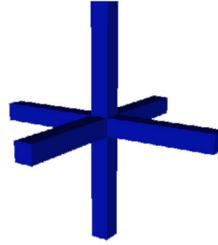


FIG. 3.6 – Curseur virtuel

Cibles sur axe Oy	Cibles sur axe Oz	Cibles hors axes
<p>p1(0,20,0) p2(0, -20, 0)</p>	<p>p3(0,0,20) p4(0,0,-20)</p>	<p>p5(10,10,14.14) p6(10,10,-14.14) p7(10,-10,14.14) p8(10,-10,-14.14) p9(-10,-10,14.14)</p>

TAB. 3.1 – Distribution des cibles sur et hors axes

Les boules cibles apparaissent en 9 endroits prédéfinis, à une distance égale de la boule de départ. La Figure 3.7 montre différentes vues des cibles placées sur un modèle 3D du plan de travail virtuel. La Figure 3.8 illustre ces positions dans l'espace.

Seule la perception de position dans l'espace résultant de la vision stéréoscopique était disponible, en particulier, aucune indication visuelle sur la profondeur n'a été fournie (comme par exemple les axes sur la Figure 3.8). Au cours de la tâche, la boule de départ et le curseur sont toujours affichés. La boule cible n'est affichée qu'après la sélection de la boule de départ, et reste affichée jusqu'à ce qu'elle soit sélectionnée par l'utilisateur.

Les sujets avaient comme consigne d'effectuer chaque tâche aussi rapidement que possible.

Seules les translations du stylo sont appliqués au curseur, pas les rotations. La raison de

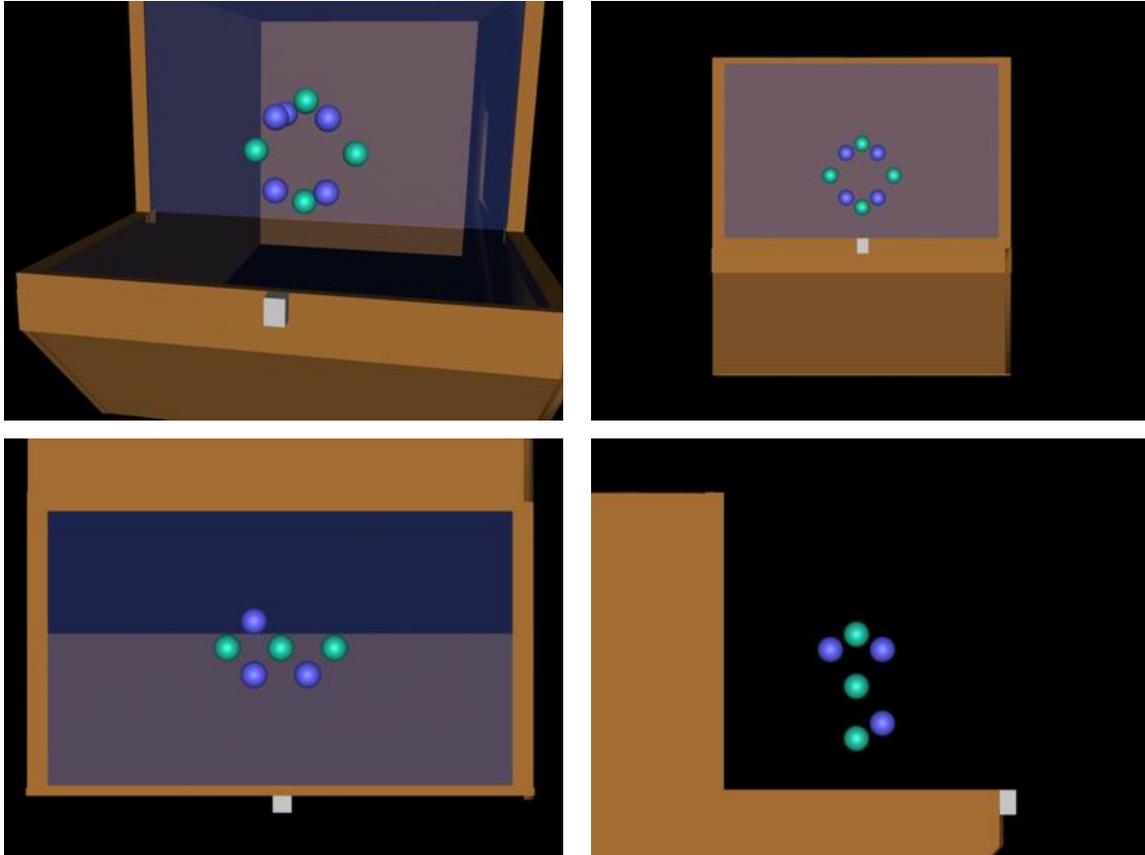


FIG. 3.7 – Positions des cibles par rapport au Plan de Travail Virtuel, (vues de dr. à g. et de haut en bas : perspective, face, haut, transversale)

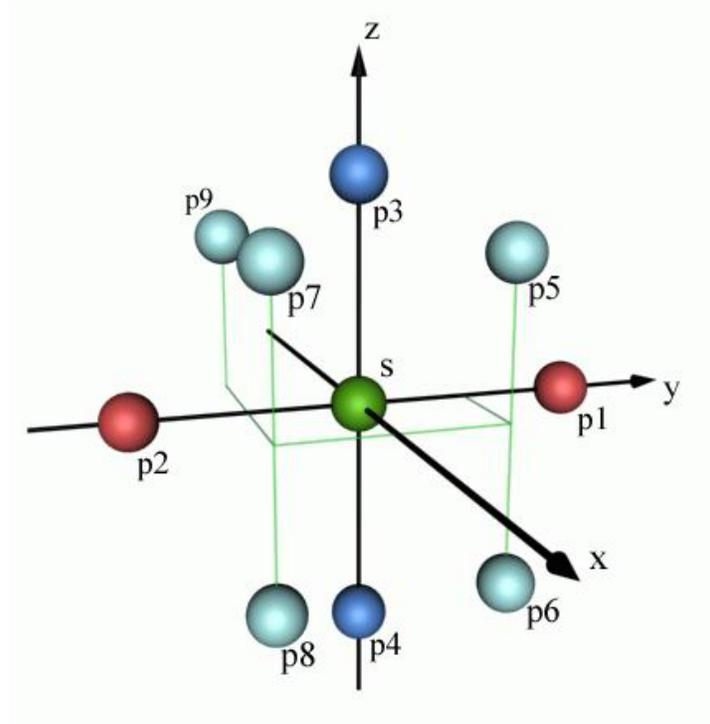


FIG. 3.8 – Position des cibles dans l'espace

ce choix est de s'assurer que tous les utilisateurs effectuent la tâche en utilisant la même stratégie de déplacement. En effet, si nous avons appliqué les rotations sur le curseur, avec la main de l'utilisateur comme centre, les utilisateurs auraient pu combiner un déplacement en translation et un déplacement en rotation. Plus la distance au curseur est grande, plus la vitesse angulaire du curseur est grande, et une petite rotation du poignet aurait effectué une grande translation du curseur, ce que nous cherchons à éviter.

Chaque utilisateur a effectué l'expérience suivant toutes les conditions de distance de manipulation. Pour annuler les effets d'ordre de passage, chacun des sujets est passé sur un ordre différent de ces conditions (les 24 permutations des 4 conditions). Pour chaque condition, une session de 3 tâches d'essai puis 18 tâches effectives est réalisée. Pour les 18 tâches effectives, les boules cibles sont présentées 2 fois en chacun des 9 endroits prédéfinis, dans un ordre aléatoire.

3.3.3 Participants

Sept femmes et dix-sept hommes ont participé à chacune des deux sessions. Tous ont une vision normale ou corrigée. Dix-huit étaient droitiers, cinq gauchers. Une des personnes gauchères a préféré tenir le périphérique de pointage (stylus) dans sa main droite.

3.3.4 Facteurs étudiés

Deux facteurs indépendants sont étudiés : position de la boule cible (les 9 cibles prédéfinies) et la distance de manipulation. Il s'agit donc d'une expérience à $4(\text{distance de manipulation}) \times 9(\text{position des cibles})$ tâches différentes, chaque tâche est répétée 2 fois. Le temps de parcours des deux tâches pour chaque position cible est moyenné pour ne donner qu'une seule valeur. La Figure 3.9 illustre les valeurs moyennes de temps de parcours de la tâche en fonction de la distance de manipulation.

Pour définir la distance de manipulation, le curseur est décalé relativement à la main de l'utilisateur dans une direction donnée. Le choix de cette direction n'est pas arbitraire.

La direction de décalage est dans tous les cas parallèles à l'axe Ox (voir Figure 3.8), ainsi la position du curseur dans l'espace est la position de la main composée à une translation (de 0, 20, 40 ou 55 centimètres) sur l'axe des abscisses. Dans cette expérience le facteur d'échelle entre les mouvements de la main et ceux du curseur est $f = 1$, la métrique est donc la même pour l'espace de manipulation et celui de visualisation.

3.3.5 Données recueillies

Les données suivantes ont été recueillies lors des expériences :

- **Temps de parcours** : la variable dépendante recueillie pour chaque tâche est le temps de parcours. C'est le temps écoulé entre le clic sur la sphère de départ et le clic sur la boule cible.
- **Mouvements de la main** : les déplacements de chaque utilisateur tout au long de la tâche ont été stockés.
- **Questionnaire** : dans un questionnaire fourni à la fin de l'expérience nous avons demandé à chaque sujet de classer les différentes conditions de manipulation dans l'ordre de préférence.

3.3.6 Résultats pour le temps de parcours

L'analyse de variance (ANOVA) sur le temps moyen de parcours de la tâche (Figure 3.9) indique un effet significatif de la *distance de manipulation* ($F(3, 828) = 131.191, p < 0.0001$). L'analyse post-hoc pour la distance de manipulation avec le test de Scheffé montre que les sujets accomplissent la tâche plus rapidement pour les distances de 0 centimètres et de 20 centimètres que pour 40 centimètres et 55cm.

Il n'y a pas de différence significative entre 0 (manipulation directe) et 20 cm, ainsi qu'entre 40 et 55 cm.

La *position de la cible* a un effet significatif sur la performance ($F(8, 828) = 16.55, p < 0.0001$). L'analyse post-hoc pour la position de la cible montre que les cibles hors axes p8 et p9 prennent significativement plus de temps pour être atteintes que toutes les autres. La

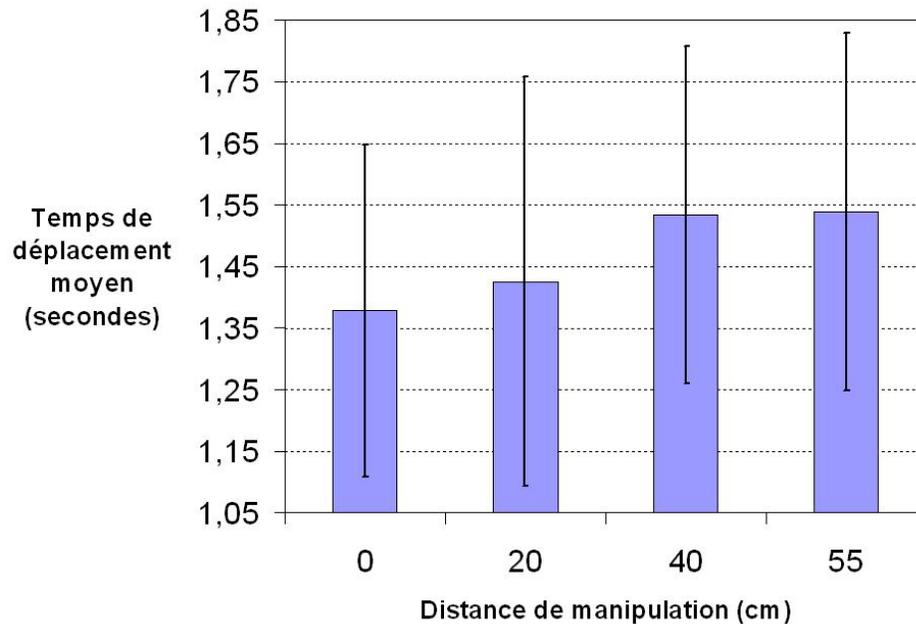


FIG. 3.9 – valeurs moyennes des temps de parcours en fonction de la distance de manipulation

cible p5 prend significativement plus de temps que p2.

Les cibles placées sur les axes sont atteintes plus rapidement que les cibles hors axes, sauf pour la cible p4, qui prend en moyenne plus de temps que p6 et p7, mais ces résultats ne sont pas statistiquement significatifs. La cible p2 est la cible la plus rapide à atteindre.

Il existe une interaction significative entre *distance de manipulation* et *position de la cible*, ($F(24, 828) = 5,574, p < 0.0001$). La Figure 3.10 donne les temps moyens par cible.

3.3.7 Mouvements de la main

3.3.7.1 Trajectoires

La Figure 3.11 montre 9 trajectoires correspondant aux mouvements effectués par le premier sujet en manipulation directe, ainsi qu'une superposition de trajectoires, donnant une idée générale du type de mouvement effectué pour accomplir la tâche.

3.3.7.2 Courbes de Vitesse

La Figure 3.12 montre une courbe de vitesse type au cours d'une la trajectoire et une courbe de vitesse où la cible à été manquée au premier passage. Cette dernière présente des varia-

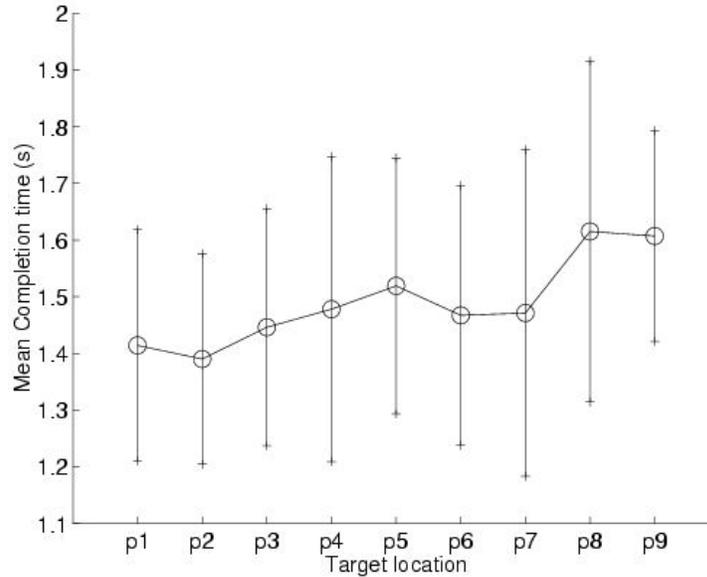


FIG. 3.10 – Valeurs moyennes de temps de parcours de la tâche en fonction de la position de la boule cible

tions de vitesse en fin de parcours correspondant aux corrections de trajectoire en fin de mouvement.

3.3.8 Questionnaire : réponses qualitatives des utilisateurs

Pour les deux expériences, nous avons demandé aux sujets de classer les conditions de manipulation dans un ordre croissant de difficulté. Le tableau 3.2 résume ces résultats pour la première expérience.

	0 cm	20 cm	40 cm	55 cm
1 (plus facile)	10	5	2	7
2	6	12	4	2
3	3	4	12	5
4 (plus difficile)	5	3	6	10

TAB. 3.2 – Session 1 : Nombre de sujets ayant noté chaque condition de manipulation (distances de 0, 20, 40, et 55 cm), entre 1 (plus facile) et 4 (plus difficile)

Les conditions de manipulation à 0cm et 20cm de distance sont significativement plus appréciées que 40cm et 55cm ($\chi^2(3)=14.33$, $p<0.005$).

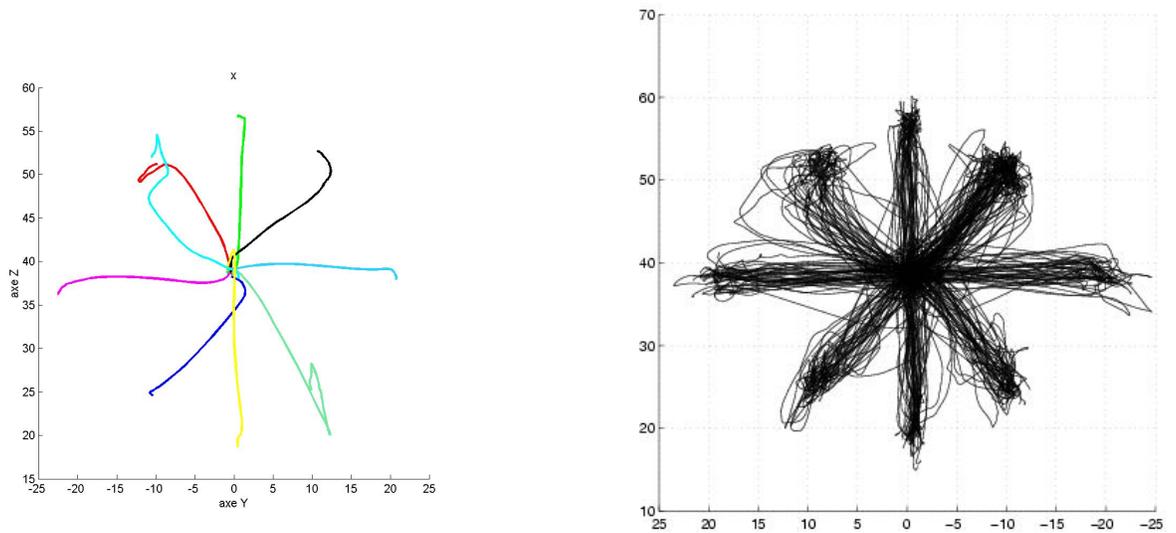


FIG. 3.11 – Trajectoires de déplacement pour les 9 cibles. **Gauche** : exemples de trajectoires effectuées vers chaque cible lors de la tâche. **Droite** : superposition des trajectoires effectuées par la main d'un sujet.

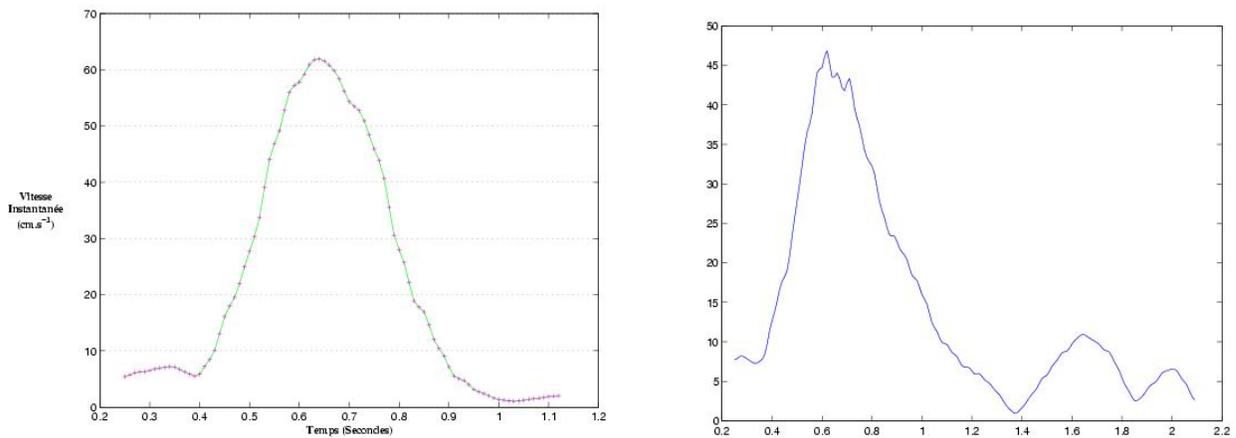


FIG. 3.12 – **Gauche** : Courbe type de vitesse lors d'un trajet, on retrouve la forme en cloche habituellement observée dans les trajectoires de pointage. **Droite** : courbe de vitesse avec corrections de mouvement en fin de trajet (trajet lors duquel la cible a été manquée au premier passage)

3.4 Deuxième expérience : indice visuel et facteur d'échelle

Pour chercher à mieux comprendre les résultats de la première expérience, nous avons effectué une seconde expérience. Nous nous sommes placés dans le cas d'une manipulation à 55 cm de distance, pour la même tâche de pointage que dans la première expérience. Tout en modifiant la méthode d'interaction de plusieurs façons, nous avons observé les variations d'efficacité de manipulation à cette distance.

Premièrement, nous nous sommes intéressés à la séparation visuelle existant entre la main de l'utilisateur et le curseur. L'hypothèse étant que cette séparation visuelle tend à décorrélérer les mouvements du curseur de ceux de la main, et donc à induire une difficulté supplémentaire pour la manipulation, nous avons ajouté un lien visuel. Il s'agit d'un rayon virtuel reliant la main de l'utilisateur et le curseur agissant sur le monde virtuel.

Deuxièmement, nous avons voulu aborder la question de l'équivalence des mouvements dans le monde réel et le monde virtuel. Le parallèle avec l'environnement des stations de bureau est ici direct : dans les environnements WIMP, les mouvements de la souris sont appliqués sur le pointeur avec une fonction de transfert paramétrable. On peut modifier l'échelle de déplacement, l'accélération du curseur. Ces paramètres de manipulation peuvent influencer les performances de pointage.

3.4.1 Facteurs étudiés

3.4.1.1 Indice visuel

Le premier facteur est la présence ou non du *lien visuel*, qui est un rayon virtuel liant la main de l'utilisateur au curseur (deux valeurs : affiché, non affiché). Quand le rayon est affiché, il est toujours dirigé selon l'axe des abscisses, parce qu'aucune rotation n'y est appliquée (voir Figure 3.13).

3.4.1.2 Facteur d'échelle

Le deuxième facteur est le *facteur d'échelle*, pour lequel deux valeurs sont étudiées : 1 et 1,5. Pour $f = 1$, la distance de manipulation est de 55 centimètres. Pour $f = 1,5$ la distance de manipulation est variable.

La combinaison de ces facteurs mène à 4 techniques de manipulation différentes :

- $f=1$, pas d'indice visuel, il s'agit de la manipulation à 55cm de distance étudiée dans la première expérience
- $f=1$, avec indice visuel
- $f=1.5$, pas d'indice visuel
- $f=1.5$, avec indice visuel

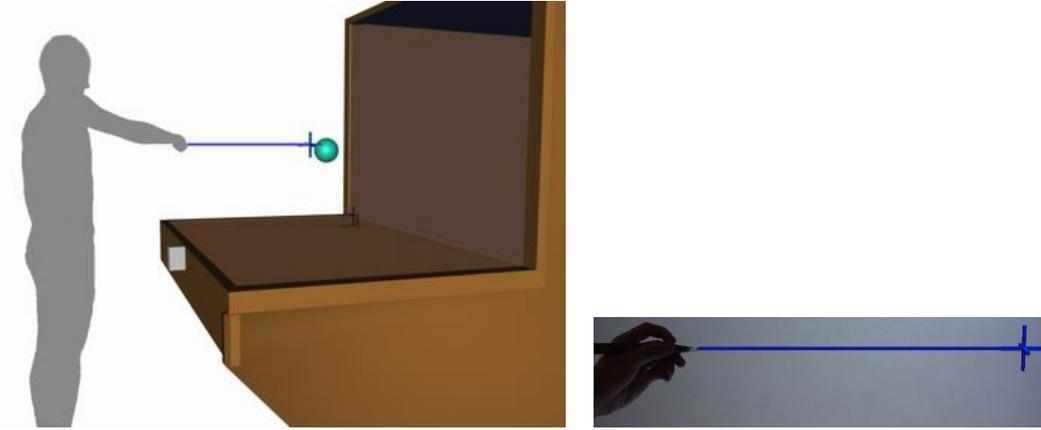


FIG. 3.13 – Manipulation avec le rayon virtuel

3.4.1.3 Positions des boules cibles

Dans cette deuxième expérience, les boules cibles apparaissaient aux mêmes endroits que pour dans la première expérience. Cependant, pour la manipulation avec $f = 1,5$, la distance séparant la boule de départ et les cibles est aussi multipliée par le facteur d'échelle. La raison de ceci est que le déplacement physique de la main de l'utilisateur entre la boule de départ et la boule cible doit être le même que pour $f = 1$.

3.4.2 Résultats

3.4.2.1 Temps de parcours

L'analyse de variance (ANOVA) sur le temps moyen de parcours de la tâche indique un effet significatif du *lien visuel* ($F(1, 828) = 20.249, p < 0.0001$), en moyenne, les sujets mettent plus de temps à effectuer la tâche avec le *lien visuel* que sans. Il y a aussi un effet significatif du *facteur d'échelle* ($F(1, 828) = 253.330, p < 0.0001$). Les sujets effectuent en moyenne la tâche plus lentement lorsque le *facteur d'échelle* est de 1,5. La Figure 3.14 montre les temps moyens en fonction de ces deux variables.

3.4.2.2 Position de la cible

La *position de la cible* a aussi un effet significatif ($F(8, 828) = 11.16, p < 0.0001$), la Figure 3.15 montre les temps moyens en fonction de la *position de la cible*.

L'analyse post-hoc pour la *position de la cible* montre, comme dans la première expérience que les cibles hors-axes p8 et p9 prennent significativement plus de temps que les autres. Des effets d'interaction significatifs existent entre les deux variables *facteur d'échelle* et *position de la cible* ($F(8, 828) = 4.44, p < 0.0001$), et entre les variables *indice visuel* et *position de*

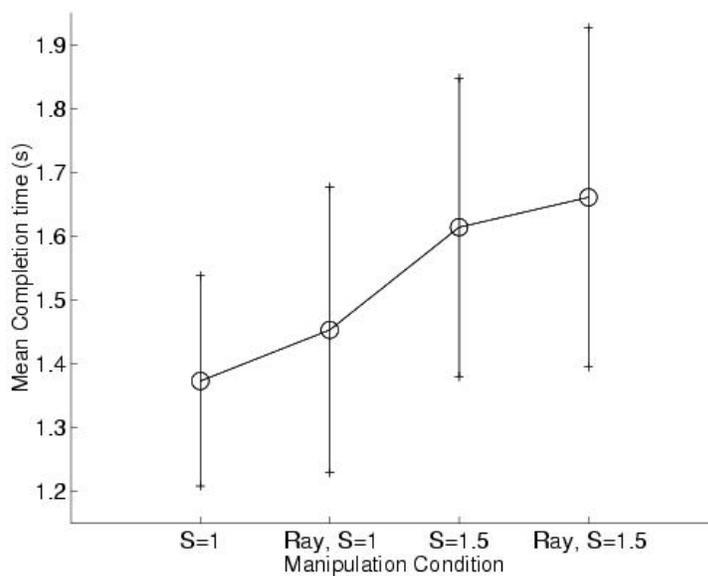


FIG. 3.14 – valeurs moyennes de temps de parcours de la tâche en fonction de la technique de manipulation (lien visuel, facteur d'échelle $f=1$ ou $1,5$)

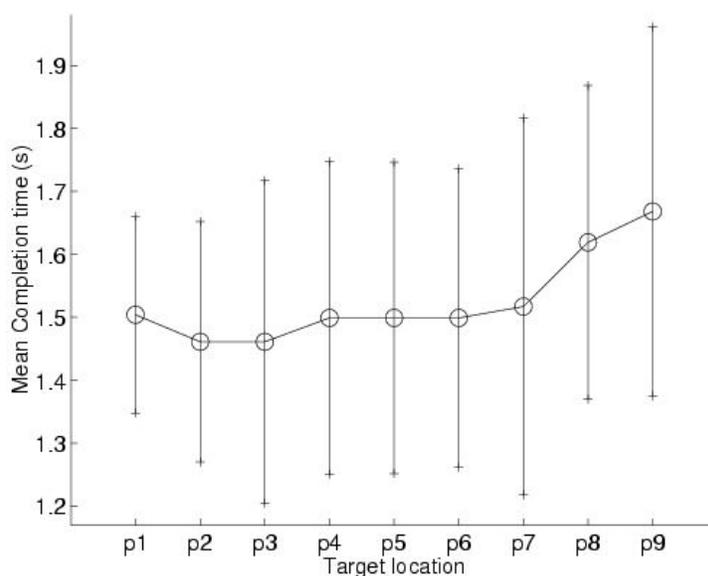


FIG. 3.15 – valeurs moyennes de temps de parcours de la tâche en fonction de la position de la cible, seconde expérience

la cible ($F(8, 828) = 2.27, p = 0.0213$).

L'interaction entre les trois variables *facteur d'échelle*, *lien visuel* et *position de la cible* est aussi significative, avec ($F(8, 828) = 4.85, p < 0.0001$).

3.4.3 Réponses qualitatives des utilisateurs

Les réponses des utilisateurs pour l'expérience 2 (voir 3.3) ne montrent pas de préférence significative pour l'une ou l'autres des méthodes (test du χ^2 non significatif).

	55cm	55cm et lien visuel	f=1.5	f=1.5 et lien visuel
1 (plus facile)	9	7	3	5
2	6	6	6	6
3	5	4	5	10
4 (plus difficile)	4	7	10	3

TAB. 3.3 – Session 2 : Nombre de sujets ayant noté chaque condition de manipulation, entre 1 (plus facile) et 4 (plus difficile)

3.5 Analyse et discussion des résultats des deux études

3.5.1 Temps de parcours

Un modèle simple des performances des utilisateurs pouvait être que le temps d'exécution augmente linéairement avec la distance de manipulation. Les résultats montrent que ce n'est pas le cas et que le comportement des utilisateurs est plus complexe. Les résultats pour le temps de parcours de la tâche suggèrent l'existence de deux domaines de distances de manipulation qui diffèrent de manière significative.

Le domaine de 0 à 20 centimètres peut être interprété comme une zone de manipulation directe, puisque les performances y sont équivalentes. Ce résultat concorde avec les travaux de Djajadiningrat et al. [28] qui ne trouvent pas de différence significative en performances entre une manipulation directe et une manipulation à 20 centimètres de distance, dans le cadre du système virtuel Cubby.

Pour des distances de manipulation de 40 à 55 centimètres, les temps de parcours moyens sont sensiblement supérieurs à ceux observés dans le domaine 0-20 centimètres. Ces distances semblent correspondre à un domaine où les sujets adoptent un comportement différent, ou semblent être engagées dans une tâche plus complexe.

Il est possible que ces résultats concordent avec ceux de Mine et al. [69] qui prouvent que la manipulation à distance provoque des performances inférieures. En effet, Mine et al. utilisent

une distance de manipulation aléatoire de 10 à 60 centimètres pour chaque tâche. Cette distance peut être considérée comme une distance de 35 centimètres en moyenne, plus proche du domaine 40-55 centimètres, que du domaine de 0-20 centimètres. Cependant, le fait que la distance n'est pas fixée dans l'expérience de Mine est une différence importante dans les conditions entre les deux expériences.

3.5.1.1 Temps de parcours en fonction des cibles

Le temps moyen nécessaire pour atteindre les cibles situées hors des axes (excepté p6 et p7 qui sont plus rapides à atteindre que p4) est supérieur à celui des cibles situées sur les axes. Mais ces résultats ne sont pas statistiquement significatifs, et nécessitent d'autres expérimentations.

La comparaison des performances pour les cibles situées sur les axes (Oy et Oz, voir Figure 3.8) montrent des résultats conformes à ceux d'une étude de positionnement d'objets 3D faite par Boritz et al. [20] : les cibles impliquant un mouvement vertical (p1 et p2) sont plus longues à atteindre que les cibles impliquant un mouvement latéral (p3 et p4).

Dans notre expérience ces différences de performances ne sont pas statistiquement significatives, Boritz et al. ont une différence statistiquement significative entre p2 et p4. Les cibles p8 et p9 sont significativement plus longues à atteindre pour les distances de manipulation de 40 et 55cm. Ceci illustre l'interaction significative entre les deux variables *distance de manipulation* et *position de la cible*.

Ces résultats tendent à montrer que le traitement cognitif supplémentaire pour les distances supérieures se manifeste plus franchement pour les cibles hors axes. Les résultats pour la *position de la cible* pour l'étude de la distance de manipulation montrent que les sujets mettent significativement plus de temps à atteindre les cibles p8 et p9. Nous pouvons ici remarquer les spécificités de ces cibles pouvant expliquer ces résultats :

- **Profondeur** : La cible p9 est la plus éloignée de l'utilisateur, sa surface visible est donc plus petite et peut être plus difficile à voir que les autres cibles.
- **Accessibilité visuelle, occlusion par l'utilisateur** : La cible p8 est située dans la zone inférieure et à gauche de l'espace de manipulation, et peut être cachée par le bras des utilisateurs gauchers lorsqu'ils cliquent sur la boule de départ, ceci peut mener à un plus grand temps à trouver la cible p8, ou à se rendre compte de sa présence.

3.5.1.2 Perception stéréoscopique

Nous avons envisagé une première hypothèse pour expliquer la diminution de performance relative à la perception de la profondeur. Yoshida et al., dans les travaux décrits en [96], se sont intéressés à l'effet de l'éloignement des utilisateurs par rapport à l'écran de visualisation sur la perception de la profondeur, avec un système offrant un point de vue dynamique. En considérant quatre valeurs de distance entre 60 et 100 centimètres, ils ont constaté que plus la distance à l'écran est grande, plus les utilisateurs sous-estiment la distance à un objet virtuel affiché en un point fixe de l'espace stéréoscopique. Ils notent que l'erreur observée est

toujours inférieure à 10 millimètres.

Dans notre expérience, les utilisateurs ont légèrement reculé par rapport au plan de travail virtuel (maximum 40 centimètres) pour les distances de manipulation de 40 et 55 centimètres, afin que leur bras soit en position confortable. Le point de vue dynamique a été utilisé dans notre expérience comme dans l'expérience de Yoshida et al., les sujets étaient donc susceptibles de faire les mêmes erreurs de perception de profondeur que dans leur expérience. Cependant, les erreurs observées par ces auteurs sont petites, comparées à la taille des sphères utilisées pour la tâche (le diamètre des boules est de 5 centimètres, l'erreur maximale de perception de profondeur est de l'ordre de 10 millimètres), suggérant que celles-ci ne sont pas susceptibles d'affecter les performances des sujets.

3.5.1.3 Cohérence des informations visuelles et proprioceptives

Nous proposons d'interpréter ces résultats en termes de cohérence entre les l'informations visuelle et proprioceptive. Pour le premier ensemble de distances (0-20 cm), nous pouvons considérer que le repère de référence de l'utilisateur est sa main, et que de ce fait, il effectue la tâche en déplaçant sa main vers l'endroit désiré. Dans ce mode de manipulation, l'information visuelle et proprioceptive sont fortement corréllées et l'utilisateur peut facilement les employer conjointement.

Pour le deuxième ensemble de distances (40-55cm), nous pouvons considérer que le repère de référence de l'utilisateur est, non plus sa main, mais le curseur virtuel, signifiant qu'il effectue la tâche en déplaçant le curseur, et non sa main, vers l'endroit désiré. Dans ce cas-ci, l'utilisation conjointe de l'information visuelle et proprioceptive représente une charge cognitive supérieure, car ces deux informations ne sont pas aussi étroitement liées que lorsque la main est la référence.

Le mouvement de la main peut être cognitivement plus complexe dans le second cas parce que l'utilisateur doit tenir compte de la différence de repère de référence. Ce traitement additionnel peut expliquer la diminution de performances observée pour les distances de 40 et 55cm. Graziano, dans [39] souligne le caractère dépendant des informations visuelles et proprioceptives.

3.5.1.4 Influence de l'indice visuel et du facteur d'échelle

Pour la seconde session, notre hypothèse était qu'en ajoutant un indice visuel figurant un lien entre la main et le curseur aiderait l'utilisateur. Mais au contraire, les résultats montrent que les performances sont sensiblement inférieures quand le lien visuel est affiché.

Cette session a mis en jeu une manipulation à une distance de 55 centimètres. Selon notre première hypothèse de cohérence entre les informations visuelles et proprioceptives, la manipulation à distance induit que le repère de référence pour effectuer la tâche est le curseur virtuel et non la main de l'utilisateur.

L'objectif du lien visuel est de relier la main de l'utilisateur et le curseur virtuel afin qu'ils représentent un seul et même "outil". Mais cet objectif ne semble pas être atteint, tout se passe comme si le lien visuel trouble l'utilisateur dans son choix de repère de référence, plutôt qu'il ne l'aide.

Les résultats pour le *facteur d'échelle* dans la deuxième session montrent que les utilisateurs sont plus efficaces avec une échelle de mouvements identique ($f=1$) qu'avec une échelle ($f=1.5$). Ce résultat est conforme aux travaux précédents effectués par Mine et al. [69]. L'effet du *facteur d'échelle* peut être interprété à la lumière de l'hypothèse sur la cohérence entre les informations visuelle et proprioceptive : de la même façon que la distance de manipulation induit un traitement additionnel de l'information, le *facteur d'échelle* ajoute l'échelle comme différence supplémentaire entre les deux informations.

3.5.2 Questionnaire

Les commentaires des sujets sur la facilité d'exécution de la tâche sont en accord avec les performances effectivement mesurées. La plupart des utilisateurs considèrent la manipulation directe comme étant plus facile. Plus la distance de la manipulation croît, plus la tâche est considérée comme difficile. Notons que les utilisateurs préfèrent la manipulation directe, bien que la réaction des utilisateurs (souvent, les plus novices) est de manoeuvrer à distance des objets virtuels, voire même de se retrouver dans des situations où leur main se retrouve derrière leur épaule.

Ces résultats sont proches des commentaires d'utilisateurs dans les études de Mine et Djajadiningrat, lors desquelles les utilisateurs ont préféré la manipulation directe.

Conclusion

Une première expérience a été conduite pour étudier l'influence de la distance de manipulation sur les performances lors d'une tâche de pointage. Les résultats montrent que lorsque les utilisateurs manipulent à une distance faible (manipulation directe et à 20 cm de distance) leurs performances sont significativement meilleures que lorsqu'ils manipulent à des distances de 40 et 55cm.

Nous proposons une interprétation basée sur la cohérence entre les informations visuelle et proprioceptive : pour la manipulation proche (directe et 20cm) nous considérons que les informations visuelle et proprioceptive sont fortement corrélées. Pour les distances supérieures, ces deux informations ne sont plus aussi cohérentes, ceci peut représenter une charge cognitive plus importante et expliquer la baisse de performances.

Ces résultats nous incitent à conseiller aux utilisateurs de manipuler les objets le plus directement possible.

Une seconde expérience a permis d'étudier l'influence de l'ajout d'un indice visuel dans le cas d'une manipulation à distance. Cet indice relie visuellement la main de l'utilisateur au curseur virtuel lui permettant d'agir sur les objets. L'objectif était de faciliter la manipulation. Contrairement à l'effet attendu, l'ajout de l'indice visuel détériore les performances. D'autre part, dans cette seconde expérience nous avons étudié l'effet du facteur d'échelle de mouvement, l'utilisation d'une échelle de mouvement de 1,5 détériore les performances comparativement à une correspondance exacte (échelle 1) entre la métrique du mouvement de la main et celle du mouvement de l'objet virtuel contrôlé.

Pour la suite de nos travaux, relatifs à la recherche de solutions de retour d'effort passif en environnement immersif, ces résultats ont pour conséquence directe de nous inciter à choisir des solutions pour lesquelles les utilisateurs peuvent manipuler directement.

Chapitre 4

Retour haptique passif en forces internes en Environnement Immersif

Nous explorons dans ce Chapitre deux possibilités pour la mise en oeuvre d'un système de retour d'effort passif dans un environnement immersif.

*Le principe du retour d'effort passif que nous cherchons se base sur une interaction entre le sens de la vue et celui du toucher. Les deux éléments principaux du retour d'effort passif envisagé sont le **retour visuel** et la **réaction mécanique** passive d'un périphérique de contrôle. Nous distinguons un facteur principal pour la mise en place de solutions de retour d'effort passif : le mode de contrôle, qui peut être soit **relatif**, soit **absolu**.*

Au vu des résultats du Chapitre 3 sur la distance de manipulation, nous choisissons de nous orienter vers les solutions permettant une manipulation directe. Dans cette optique nous nous orientons vers les solutions où le périphérique est mobile, permettant à l'utilisateur de placer sa main là où il le désire dans la scène.

Nous étudions deux types de solutions destinées à retourner à l'utilisateur des forces internes avec un périphérique mobile, non relié au sol. La première est en commande relative, la seconde en commande absolue. Sur la base d'essais informels, les utilisateurs décrivent des sensations de frottement ou de viscosité dans des zones virtuelles, mais plutôt dûes à l'information visuelle qu'à une sensation haptique réelle fournie par le périphérique.

Introduction

Le retour pseudo-haptique, qui a servi de point de départ à nos travaux, fait partie d'un concept plus général qui est celui de l'interaction entre modalités sensorielles. Lécuyer et al. [58] ont défini les systèmes pseudo-haptiques comme des systèmes permettant de fournir une information haptique générée, augmentée ou modifiée par l'influence d'une autre modalité sensorielle. Ils l'ont évalué dans le cas d'une interaction entre le sens de la vue et celui du toucher. Le principe de cette interaction est schématisé sur la Figure 4.1.

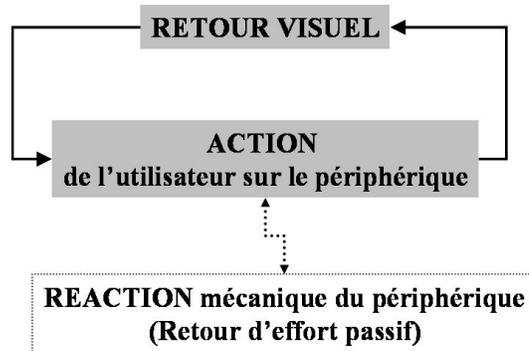


FIG. 4.1 – Interaction vue/toucher pour le retour d'effort pseudo-haptique

Notre objectif est d'utiliser une interaction similaire entre les sens de la vue et du toucher pour proposer un retour d'effort passif dans un environnement immersif pour simuler des propriétés comme les frottements ou la viscosité.

Les deux caractéristiques de la simulation de retour d'effort que nous cherchons à mettre en place sont :

- *le retour visuel* c'est à dire le déplacement visuel de l'objet virtuel manipulé,
- un périphérique muni d'un capteur de force, offrant une *réaction mécanique* aux actions de l'utilisateur.

Le retour visuel, c'est à dire le déplacement visuel de l'objet virtuel influence les actions de l'utilisateur sur le périphérique. Ce lien particulier entre l'action de l'utilisateur sur le périphérique et le déplacement visuel de l'objet virtuel est une question centrale dans la mise en oeuvre des méthodes de retour d'effort passif que nous cherchons. Nous appelons *mode de commande* cette liaison entre les actions de l'utilisateur et les déplacements résultants de l'objet. Le mode de commande des objets, qui peut être *relatif* ou *absolu*.

Dans ce Chapitre, nous explorons et évaluons informellement deux approches de retour d'effort passif destinées à retourner des forces internes¹ à l'utilisateur. L'une en commande relative, la seconde en commande absolue.

¹voir page 34, Section 1.1.3.

4.1 Mode de commande

Dans l'optique de proposer un retour d'effort de type passif pour un système immersif, la première question que nous nous sommes posés est : comment l'utilisateur va-t-il déplacer les objets dans l'univers virtuel ?

Nous distinguons deux modes d'action pour commander le déplacement des objets virtuels : la commande *relative* et la commande *absolue*.

4.1.1 Mode relatif ou commande en vitesse

Ce mode de commande permet de déplacer un objet virtuel en spécifiant un vecteur vitesse à l'aide d'un périphérique adéquat.

Les périphériques isométriques, du type SpaceballTM ou SpacemouseTM (Figure 4.2) sont des périphériques fréquemment utilisés pour la commande relative. Ce sont des périphériques immobiles, ou dont le déplacement est faible autour d'une position centrale. Pour commander le déplacement d'un objet virtuel, on applique une pression sur le périphérique. La direction et l'ampleur de cette pression permettent de définir un vecteur vitesse de déplacement qui est appliqué à l'objet virtuel manipulé (voir Figure 4.3).



FIG. 4.2 – Spacemouse

4.1.2 Mode absolu ou commande en position

Ce mode de commande consiste à utiliser les mouvements de l'utilisateur dans l'espace, le plus souvent sa main, et de déplacer l'objet virtuel suivant ces mouvements (voir Figure 4.3).

La fonction de transfert utilisée pour passer des mouvements de la main de l'utilisateur à ceux de l'objet virtuel peut être l'identité, ou encore une fonction réduisant ou augmentant les mouvements de l'utilisateur. Cependant toute fonction de transfert de ce type n'implique

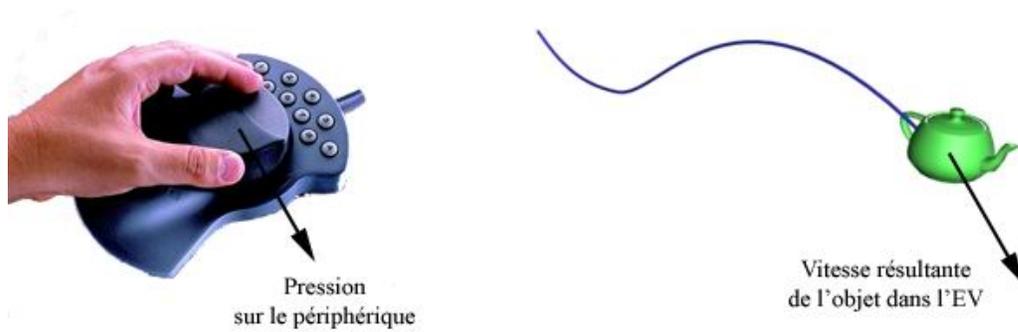


FIG. 4.3 – Commande relative

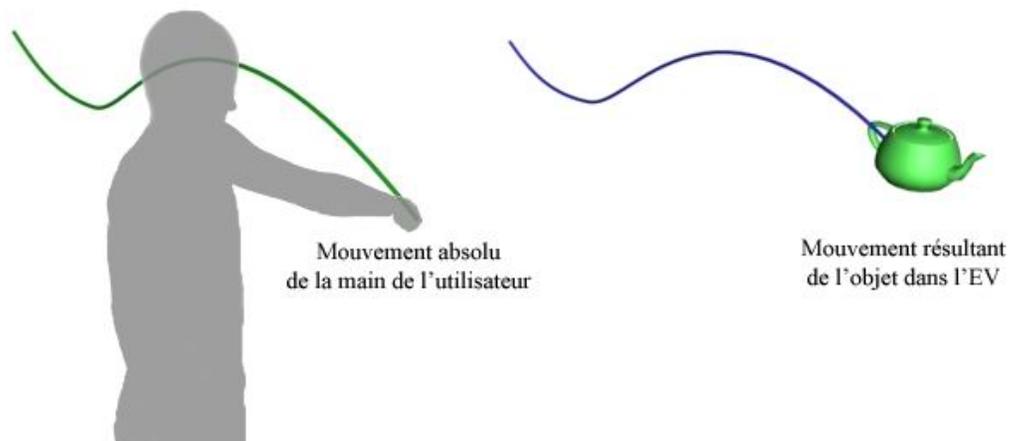


FIG. 4.4 – Commande absolue

pas obligatoirement une commande absolue, notamment concernant le gain de déplacement. Un gain exagéré, amplifiant fortement les mouvements de la main ou au contraire un gain très faible n'est pas vraiment absolu car le mouvement de l'objet virtuel n'a plus vraiment de sens par rapport aux mouvements de l'utilisateur.

Nous retenons pour notre définition que le déplacement $\Delta\vec{l}$ du périphérique mesuré à chaque pas de la simulation est reporté sur l'objet en un mouvement $\Delta\vec{l}_{objet}$ de même direction et éventuellement de même norme.

Le mode absolu nécessite la connaissance de la position de la partie du corps de l'utilisateur qui commande le déplacement de l'objet, le plus souvent, il s'agit de sa main dominante. Cette information s'obtient à l'aide de systèmes de suivi de mouvements : trackers magnétiques, à ultrasons, ou encore par marqueurs infrarouges.

4.2 Réaction mécanique

C'est l'interaction mécanique entre les doigts (ou la main) de l'utilisateur et le périphérique qui est à l'origine des sensations de nature haptique simulées par le principe de retour d'effort que nous cherchons à mettre en place. Le périphérique étant purement passif, c'est à dire dépourvu de moteurs ou de tout système pouvant fournir de l'énergie à l'utilisateur, ce sont les actions de l'utilisateur sur le périphérique qui sont à l'origine de la simulation des forces. La réaction mécanique du périphérique dépend du mode de commande et du type de périphérique envisagé. Nous envisageons deux cas en ce qui concerne le périphérique : on peut utiliser un périphérique fixe, ou un périphérique mobile.

4.2.1 Périphérique fixe

Le périphérique est posé sur une table ou tout meuble stable et rigide relié au sol. Avec un périphérique fixe, les forces renvoyées à l'utilisateur sont externes et proviennent de la réaction du système table-périphérique aux actions de l'utilisateur.

C'est la solution utilisée pour le retour pseudo-haptique proposé par Lécuyer [56]. L'utilisateur perçoit les forces de réaction du périphérique isométrique fixe, posé sur une table, sur lequel il agit pour modifier la scène. Le retour d'effort a été évalué dans une situation d'estimation de raideur. Un ressort était compressé en commande relative, par l'appui sur une Spaceball, selon un degré de liberté en translation.

Lécuyer et al. on fait état d'une expérience dite "du marais", où les sujets devaient déplacer un cube sur un plan, à l'aide de pressions sur une Spaceball posée sur une table. Les sujets ressentaient des forces de frottement ou de viscosité au passage d'une zone dans laquelle de déplacement était difficile. Ici encore, la réaction du périphérique fixe semble participer des sensations de forces.

Cependant, la solution en périphérique fixe, ne nous semble pas adaptée à notre objectif d'un retour d'effort passif en environnement immersif. La caractéristique des systèmes immersifs dont nous cherchons à profiter est leur grand espace de travail et la possibilité de faire de grands gestes naturels. Si nous utilisons un périphérique fixe, la main de l'utilisateur ne pourra pas se déplacer dans l'espace d'affichage. De plus, les résultats de l'étude sur la distance de manipulation menée au Chapitre 3, nous font préférer les solutions permettant à l'utilisateur de choisir une manipulation directe.

4.2.2 Périphérique mobile

Des exemples de périphériques mobiles et *actifs* existent dans la littérature. Il s'agit soit de systèmes portables, citons par exemple un système tenu dans la main permettant de recevoir des forces internes provenant de molettes tournantes proposé par MacLean et al. [63], soit de systèmes reliés au sol permettant des forces externes, comme les bras à retour d'effort.

Nous envisageons dans ce chapitre un périphérique mobile *passif*, selon deux modes de commande, relative et absolue. Nous étudions d'abord la possibilité d'une réaction mécanique d'un périphérique suivant ces deux modes de commande.

4.2.2.1 Réaction mécanique et commande relative

En commande relative, l'action de l'utilisateur est une pression sur un périphérique. Pour le périphérique mobile, non relié au sol, cette pression sur le périphérique ne permet pas de renvoyer des forces externes, il s'agira de forces internes.

Nous pouvons envisager d'utiliser un périphérique placé dans la main de l'utilisateur, offrant une résistance interne aux pressions de l'utilisateur. Les forces de pression dues à ses actions sur le périphérique sont internes à la main et ne proviennent pas de l'extérieur, il s'agit donc d'un système en forces internes.

C'est la première possibilité que nous allons évaluer dans ce Chapitre.

4.2.2.2 Réaction mécanique et commande absolue

En commande absolue, l'action de l'utilisateur est un déplacement de sa main dans l'espace. Il n'y a pas de réaction mécanique à cette action comme dans ce cas de la commande relative pour lequel la simple présence du périphérique renvoie intrinsèquement une réaction à toute pression de l'utilisateur. Une action supplémentaire de l'utilisateur est nécessaire, additionnelle à son déplacement absolu, pour qu'il y ait une réaction mécanique.

C'est la seconde possibilité que nous allons explorer dans ce Chapitre.

4.3 Essais sur la commande relative avec un périphérique mobile

Nous cherchons à tester une solution en commande relative avec un périphérique mobile, le but étant de permettre à l'utilisateur de pouvoir déplacer sa main dans tout l'espace de travail, tout en lui permettant de ressentir des forces internes.

C'est une solution proche du retour pseudo-haptique, dans la mesure où c'est l'appui sur le périphérique isométrique ou élastique qui va provoquer une réaction mécanique passive directe aux actions de l'utilisateur. Elle diffère du pseudo-haptique sur un point principal : le périphérique n'est pas *posé*, mais *porté* par l'utilisateur.

Le déplacement de l'objet virtuel contrôlé se fait par des contraintes isométriques ou élastiques appliquées sur le périphérique, et ne nécessite pas un déplacement absolu du périphérique dans l'espace.

Nous proposons une solution où le périphérique est porté par l'utilisateur, par exemple tenu dans sa main. La capacité d'un tel système à fournir un retour d'effort est hypothétique, et nécessite des essais. On peut imaginer une solution de première approche : par exemple, utiliser une spaceball, portée dans une main, et manipulée par l'autre main. On peut imaginer que l'utilisateur déplace un objet dans l'espace, et peut aussi déplacer le système dans l'espace virtuel, tout en ressentant les forces de réaction de la spaceball.

Dans cet exemple, une des deux mains est utilisée comme support aux forces internes. C'est une situation où les deux mains sont jointes pour manipuler, pour permettre une plus grande liberté de mouvements à l'utilisateur, nous préférons nous orienter vers une solution qui ne requiert qu'une seule main, à priori moins contraignante.

4.3.1 Solution technique proposée : poignée rigide et capteur de forces

Nous proposons une solution technique à partir de la description des contraintes :

- l'utilisation d'un périphérique mobile
- le périphérique doit retourner une réaction mécanique interne
- il doit être possible de le tenir dans la main
- le périphérique doit permettre de spécifier un vecteur vitesse grâce à la pression effectuée et la direction pointée.

Pour répondre à ces contraintes, nous avons mis en place un périphérique constitué de trois éléments (voir Figure 4.5) :

- un cylindre rigide tenu dans le poing d'une main, utilisé comme une poignée,
- un capteur de forces placé sur une face du cylindre,

- un capteur de mouvements (technologie magnétique de marque PolhemusTM) pour la spécification de la direction du vecteur vitesse.

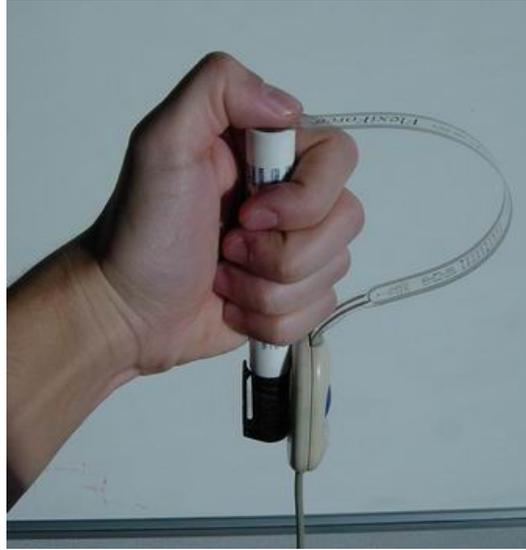


FIG. 4.5 – Périphérique proposé

Préhension et forme du périphérique

L'utilisateur tient le périphérique dans son poing, comme montré sur la Figure 4.5 et tient son pouce sur la partie supérieure munie du capteur de pression. Le vecteur vitesse de déplacement est spécifié grâce à l'orientation du périphérique et à l'action de pression du pouce sur le capteur.

Fonctionnement

Le fonctionnement du périphérique est illustré en Figure 4.6 et Figure 4.7. Il est basé sur la modification du gain de déplacement de l'objet manipulé pour simuler des contraintes. Le gain de déplacement est le rapport entre la pression exercée sur le capteur et la vitesse résultante de l'objet. Par exemple, pour simuler des frottements dans une zone virtuelle, le gain de déplacement est réduit proportionnellement à l'intensité du frottement que nous cherchons à simuler. Ainsi, l'utilisateur doit appuyer plus fort sur le périphérique pour arriver à déplacer l'objet dans cette zone.

C'est ce principe que nous allons évaluer informellement.

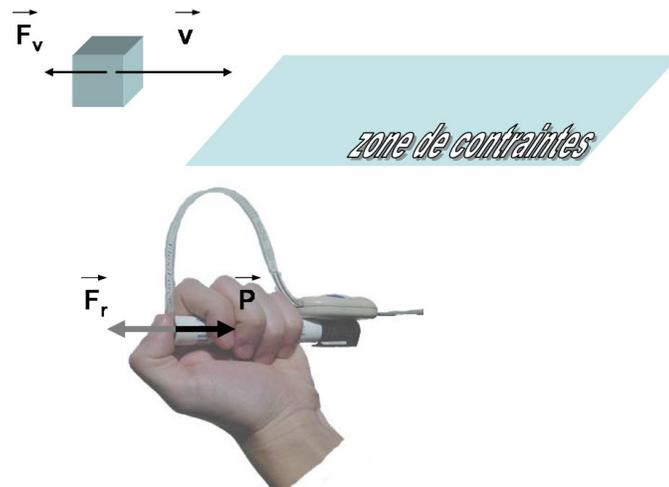


FIG. 4.6 – Fonctionnement du périphérique en commande relative et forces internes. L'utilisateur applique une pression \vec{P} sur le périphérique et le dirige dans la direction de déplacement qu'il désire, l'objet se déplace avec une vitesse proportionnelle à cette pression. Hors contraintes, le gain de déplacement de l'objet est grand, ce qui se traduit par un déplacement facile, ne nécessitant pas d'appuyer fortement sur le périphérique pour déplacer l'objet.

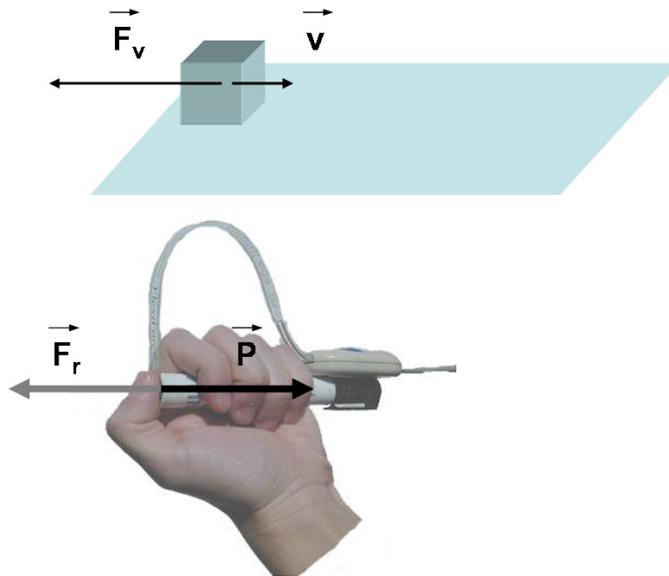


FIG. 4.7 – Fonctionnement du périphérique dans une zone de contraintes (forces de frottement virtuelles \vec{F}_v) : le gain de déplacement est réduit, l'utilisateur doit exercer une pression supérieure sur le périphérique pour déplacer l'objet dans cette zone. En réaction à la pression \vec{P} l'utilisateur reçoit une réaction \vec{F}_r .

4.3.2 Différences entre les expériences de retour pseudo-haptique et le périphérique proposé

Disparité entre la géométrie du périphérique et la représentation virtuelle

Le retour pseudo-haptique évalué par Lécuyer et al., a été évalué dans le cadre d'une simulation de ressorts virtuels. Dans cette simulation, les utilisateurs appuient sur un piston -relié à une spaceball- ce qui influe sur les mouvements d'un piston virtuel. Dans ce cas, l'action de l'utilisateur et la représentation graphique de ces actions sont proches : un piston réel est manipulé, un piston virtuel est visualisé.

Dans l'expérience de retour pseudo-haptique en couples de forces que nous avons mené au Chapitre 2, nous avons aussi cherché à garder cette similarité entre la géométrie du périphérique et celle de la représentation virtuelle : l'utilisateur tourne un bouton réel, et visualise un bouton virtuel similaire.

Dans le système que nous proposons, il y a au contraire une différence plus marquée entre les mouvements de l'utilisateur sur le périphérique et ceux de l'objet virtuel manipulé. En effet, l'utilisateur appuie sur un périphérique mobile, qu'il peut placer où il le désire dans l'espace de travail. L'objet manipulé est déplacé dans l'espace suivant les pressions internes à sa main, appliquées par son pouce sur le capteur d'effort.

Liberté de mouvements, même lors de contraintes

Si l'objet manipulé rencontre un mur virtuel ou pénètre dans une zone visqueuse, le périphérique peut potentiellement renvoyer des forces internes à la main de l'utilisateur, mais celui-ci pourra toujours librement bouger son bras dans l'espace. Cette liberté de mouvement absolus n'existait pas dans le cadre des expériences de retour pseudo-haptique.

Degrés de liberté

De plus, cette situation est plus complexe que dans l'expérience de Lécuyer et al. (simulation de ressorts en compression) et celle que nous avons menée au Chapitre 2 (ressorts en torsion). En effet, dans les expériences précédentes, l'utilisateur contrôlait un seul degré de liberté de l'objet (en translation ou rotation), alors que pour ce périphérique nous testons une manipulation à deux, voire trois degrés de liberté en translation.

D'une manière générale, avec le périphérique que nous proposons, l'utilisateur peut-t'il, associer une force virtuelle représentée visuellement par un ralentissement de l'objet qu'il contrôle, à une force interne à sa main, libre de se mouvoir dans tous les cas.

4.3.3 Tests informels

Le périphérique que nous cherchons à évaluer renvoie une force relativement localisée, au niveau de la pulpe du pouce, dans une direction bien définie, dirigée dans l'axe du cylindre

passant dans le poing, toujours orientée vers l'extérieur du pouce (voir Figure 4.6). La force étant bien définie en direction et point d'application, nous pouvons choisir des situations virtuelles pour lesquelles les forces virtuelles simulées sont de cette nature : application en un point, dans une direction constante, comme par exemple pousser un tiroir. Nous avons cependant voulu essayer le système dans une application plus complexe, en ajoutant un degré de liberté. Les utilisateurs pouvaient déplacer un objet virtuel sur un plan.

La situation que nous avons choisi pour les tests informels est celle d'un objet déplacé sur un plan, passant dans des zones visqueuses (comme illustré en Figures 4.6 et 4.7). La force simulée est une force de frottement, dirigée dans le sens opposé du mouvement. La cohérence entre forces virtuelles et forces retournées est correcte : La force simulée sur le périphérique est dirigée dans le sens opposé à celui de la direction de déplacement spécifiée.

Nous avons essayé ce périphérique dans cet exemple simple de déplacement d'un cube sur une surface plane, sur laquelle se trouve une zone "visqueuse". Huit utilisateurs ont testé le système, nous leur avons informellement demandé une impression générale. Tous ont indiqué des sensations de type *frottement* ou *viscosité*. Une personne a indiqué ressentir effectivement des forces au niveau du périphérique, les sept autres ont plutôt attribué cette sensation au ralentissement visuel perçu à l'écran qu'à une sensation haptique réelle fournie par le périphérique.

4.4 Essais sur la commande absolue avec périphérique mobile

La commande absolue pour le déplacement d'objets virtuels est décrite comme plus intuitive et plus efficace dans la littérature [98][99]. Nous allons chercher à mettre en place une solution en commande absolue pour le retour d'effort passif.

Au paragraphe 4.2.2, nous avons abordé la difficulté principale de mise en oeuvre d'un périphérique passif mobile, avec une commande absolue. Cette difficulté tient au fait que, seule, l'action de déplacement absolue qu'effectue l'utilisateur ne produit pas de réaction mécanique. Si on veut produire une réaction mécanique, une action supplémentaire de l'utilisateur est nécessaire, notamment au moment des contraintes virtuelles.

Selon le principe du retour passif envisagé, cette action doit être influencée par le retour visuel. Pour cela nous proposons, comme précédemment, d'agir sur le gain de déplacement visuel pour suggérer *visuellement* une contrainte.

En commande absolue, quelle action pourrait provoquer une réaction mécanique ? Nous proposons d'utiliser une technique inspirée des props, en proposant à l'utilisateur de maintenir un objet physique dans sa main. L'action additionnelle de l'utilisateur, permettant un retour passif est la pression sur cet objet. Cette pression est mesurée, et utilisée pour la simulation.

Les contraintes pour la mise en oeuvre d'un tel périphérique sont les suivantes :

- le périphérique doit retourner une réaction mécanique interne
- il doit être possible de le tenir dans la main
- il doit permettre de spécifier un mouvement en commande absolue
- il doit permettre de mesurer la pression effectuée par l'utilisateur

4.4.1 Réaction mécanique : solution de la “balle en mousse”

Nous proposons une solution technique pour ces contraintes. Tout d'abord, pour la base mécanique permettant d'offrir une résistance à la pression, nous avons utilisé une balle en mousse. La balle est tenue dans la paume, lorsque l'utilisateur appuie en refermant sa main autour de la balle, celle-ci renvoie une force dans toute la paume et les doigts. Cette balle en mousse joue un rôle similaire aux “props” décrits dans le Chapitre 1, Section 1.1.2. A cette fonctionnalité purement passive de la balle, nous cherchons à ajouter une dimension visuelle, pour influencer les actions et provoquer des sensations de forces.

4.4.2 Commande en mouvement absolu

Pour la spécification de la direction, nous avons intégré un capteur de position (PolhemusTM) à l'intérieur de la balle en mousse. Le déplacement absolu de l'utilisateur définit un déplacement de l'objet contrôlé.

4.4.3 Utilisation du Cyberglove pour la mesure de pression

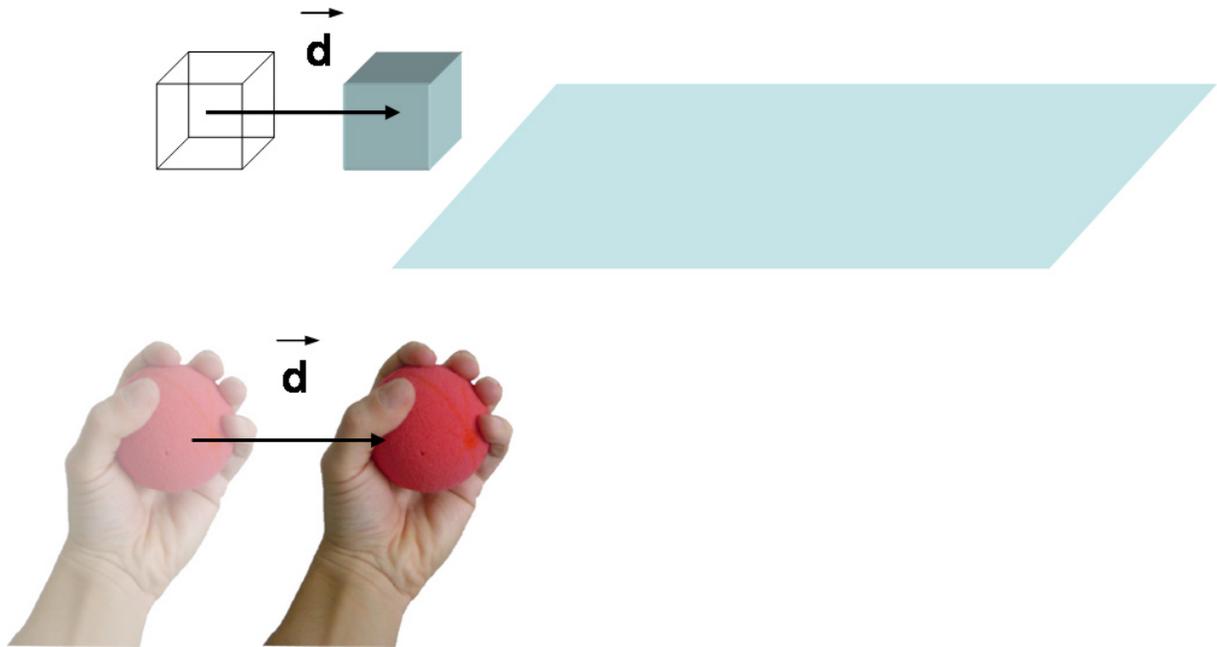
Pour la mesure de pression, nous partons du fait que l'action de serrer la balle s'accompagne systématiquement d'une fermeture progressive de la main. Plus la pression sur la balle en mousse est grande, plus celle-ci se déforme, la main passe d'une configuration ouverte vers une configuration fermée. Il y'a donc une correspondance entre la configuration de la main et la pression globale sur la balle que nous cherchons à mesurer.

Le principe général de la méthode d'interaction est présenté en Figure 4.8.

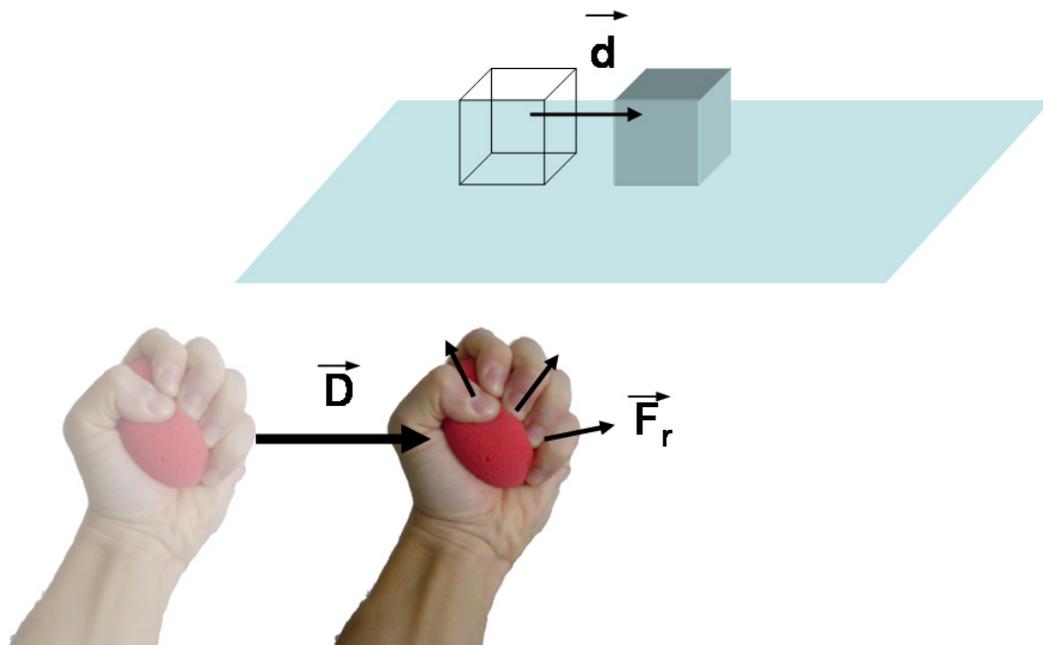
Le problème de mesure de la pression revient donc à une mesure en temps réel de la configuration de la main. Les gants de données sont des périphériques qui peuvent mesurer la position d'un certain nombre des jointures de la main (suivant le modèle). Dans le cadre de cette expérience, nous avons utilisé un gant cyberglove à 18 capteurs.

Nous avons mis en place un algorithme mettant en correspondance le degré d'ouverture de la main et un niveau de pression. La correspondance se fait lors d'une phase de calibration, consistant en un ensemble de mesures préalables. Pour un utilisateur donné, nous effectuons N mesures différentes en plaçant la main dans une configuration fixe pour chacune.

La première configuration est celle de la main ouverte, maintenant la balle en mousse sans la presser. La N-ième configuration est celle du serrage maximal, pour laquelle la main est



(a) Hors contrainte



(b) Dans une zone "visqueuse"

FIG. 4.8 – Principe du périphérique en commande absolue (le gant de données cyberglove et le système de suivi de mouvements ne sont pas représentés sur ce schéma de principe)

refermée sur la balle. Les $N-2$ autres configurations sont les positions intermédiaires. Pour chacune des N configurations la mesure consiste à stocker l'ensemble des valeurs renvoyées par les capteurs du cyberglove. Nous créons à partir de ces mesures une base de données de M configurations ($M > N$), correspondant aux N configurations mesurées et à $M-N$ configurations interpolées. Dans le prototype testé, nous avons $N=10$, $M=19$, c'est à dire que la résolution en pression du système était de 19 niveaux.

On pense simuler des forces en interne avec pression sur la balle et retour visuel. Il n'a pas de concept de direction dans le positionnement du périphérique. Il s'agit d'une pression globale sur la balle. Une question posée par l'utilisation de ce périphérique est proche du questionnement sur la disparité des forces entre les forces simulées et les forces ressenties, évoquée en Section 4.3. Ici, la disparité est entre les forces simulées (contraintes de frottement ou de viscosité lors d'un déplacement dans une plan) et l'action sur le périphérique qui est une pression générale du poing sur la balle en mousse.

Comme pour le cas relatif, nous avons essayé ce périphérique dans un exemple de déplacement d'un cube dans et hors d'une zone "visqueuse". Nous avons effectué des tests informels, les sujets décrivent des sensations de frottement ou de viscosité à l'intérieur des zones de contraintes. Cependant, la majorité des sujets a attribué ces sensations uniquement au retour visuel sans mentionner de sensation de force au niveau de la main en tant que tel.

Conclusion

La contribution principale de ce Chapitre a été d'une part de mettre en place une problématique pour la recherche d'un retour d'effort passif en environnement immersif, d'autre part d'effectuer une évaluation des différentes possibilités de mise en oeuvre.

Nous avons alors étudié en particulier deux types de solutions, *avec périphérique mobile*, et en *forces internes* permettant une manipulation directe :

En commande relative : Nous avons proposé et testé informellement un périphérique, constitué d'une poignée et d'un capteur de force, l'utilisateur spécifie la vitesse de déplacement des objets virtuels en orientant le périphérique dans l'espace et en appuyant sur le capteur.

En commande absolue : Nous avons proposé un périphérique utilisant une balle en mousse prise dans la paume, comme élément mécanique pour la réaction passive aux actions de l'utilisateur. Nous avons proposé une méthode de mesure globale de la pression sur cette balle basée sur la reconnaissance de la configuration de la main grâce à un gant de données Cyberglove.

Pour ces deux solutions étudiées, nous avons mené des tests informels. Les sujets devaient déplacer un cube à l'aide du périphérique proposé, sur un plan dans lequel se trouvait une

zone visqueuse. Les utilisateurs ont décrit une impression générale de frottement ou de viscosité dans la zone virtuelle, mais plus comme une impression visuelle qu'une force perçue au travers du périphérique.

Au vu de ces résultats, nous allons chercher au chapitre suivant à proposer un retour d'effort passif en forces *externes*.

Chapitre 5

Le retour haptique auto-contraint : une solution de retour passif en forces externes

Nous proposons une méthode de retour d'effort passif, permettant de retourner des forces externes, avec une commande absolue et un périphérique mobile doté de câbles. Une interaction entre le sens de la vue et celui du toucher est utilisée pour contrôler les forces renvoyées par le système, composé de câbles et d'un système de freinage.

Une étude est menée pour évaluer le système, consistant en deux sessions de comparaisons de viscosités virtuelles, une session avec utilisation du système (session haptique), une session en manipulation absolue, sans possibilité de retour d'effort (session purement visuelle). Nous proposons des indicateurs pour décrire la performance des utilisateurs lors de la tâche, et mesurons les forces appliquées par les utilisateurs sur le périphérique.

L'étude fait ressortir deux résultats principaux :

- la performance des utilisateurs est meilleure lors de la session haptique, en termes de score et de résolution de perception de la viscosité,*
- la force moyenne appliquée par les utilisateurs sur le périphérique croît linéairement avec la viscosité simulée. Nous formons l'hypothèse que le système renvoie des forces réelles, et que la discrimination repose sur la comparaison de forces réelles effectivement renvoyées à l'utilisateur.*

Enfin, nous avons installé ce système sur le plan de travail virtuel. Nous avons effectué des test informels, dont les résultats tendent à montrer que la version immersive est plus intuitive à utiliser, et semble retourner des forces plus réalistes que la version non immersive.

Introduction

Le retour d'effort est souvent effectué grâce à des systèmes actifs, comme les bras à retour d'effort ou les systèmes à exosquelettes retournant une force grâce à l'action de moteurs ou d'actionneurs pilotés par ordinateur. La recherche dans le domaine du retour d'effort se penche aussi sur des solutions alternatives de retour d'effort, comme les retours d'effort passifs. Nous nous sommes intéressés à certaines techniques passives aux chapitres 2 et 4. Ces techniques sont souvent plus simples et moins coûteuses que les systèmes actifs.

Nous utilisons dans ces travaux une définition des systèmes passifs qui considère l'énergie mécanique de l'utilisateur, comme nous l'avons proposé au Chapitre 1. Cette définition, proposée par Swanson [87], définit les systèmes passifs comme des systèmes qui *n'ajoutent pas d'énergie cinétique* à la main ou à la partie du corps de l'utilisateur en contact avec le dispositif.

Les techniques de retour d'effort passif utilisant des objets rigides ou déformables offrent un retour d'effort par leur simple forme ou leur texture. Ces retours d'effort passifs, appelés "props" semblent bien adaptés pour simuler les forces de réaction d'objets solides comme un cockpit virtuel, des boutons de commandes ou même un mur virtuel. On peut aussi imaginer qu'ils puissent simuler les forces de réactions d'objets compliants (éponge, ressort), si on dispose d'un objet réel ayant les propriétés physiques correspondantes.

Cependant, ces "props" ne peuvent pas s'adapter à des changements dans le monde virtuel. En effet, il est difficile de changer les propriétés physiques des objets virtuels puisque leur représentation haptique -l'objet réel- possède des propriétés physiques constantes.

Des systèmes passifs permettant de s'adapter aux changements dans l'environnement virtuel existent. Deux techniques principales se distinguent. D'une part, les *systèmes dissipatifs* proposés par Swanson [87] qui renvoient des forces en dissipant l'énergie cinétique fournie par l'utilisateur, d'autre part les *systèmes gouvernables* par Colgate et al. [23] qui renvoient des forces des réaction en réduisant les degrés de liberté du mouvement (voir Chapitre 1). Ces systèmes utilisent des actionneurs ou des moteurs contrôlés par ordinateur et peuvent s'adapter à des changements de l'environnement virtuel, c'est à dire fournir un retour différent pour des contraintes virtuelles différentes. Cependant ces systèmes comportent des actionneurs commandés par ordinateur et peuvent s'avérer coûteux et complexes à maintenir.

Le retour d'effort pseudo-haptique est une technique de retour d'effort passif qui permet de simuler des propriétés variables, sans utiliser d'actionneurs contrôlés par ordinateur. Il a été étudié par Lécuyer et al. dans le cadre de la simulation de raideurs de ressorts, nous l'avons étendu au Chapitre 2 à la simulation en couples de forces. Dans le cadre des ces expériences, le périphérique utilisé était placé sur une table, et n'était pas destiné à se déplacer dans l'espace. Dans ce cas le système proposé peut pas permettre un retour d'effort dans un espace de travail 3D.

L'objectif des travaux présentés dans ce Chapitre est de proposer un système de retour d'effort permettant de renvoyer des forces pouvant s'adapter à des changements dans la simulation, dans un grand espace de travail, sans utiliser d'actionneurs contrôlés par ordinateur.

5.1 Problématique

Lors de l'expérience de retour pseudo-haptique menée par Lécuyer et al. [58], dans celle décrites dans le Chapitre 2 de ce mémoire, ainsi que pour l'un des deux retours d'effort passif proposés au Chapitre 4, le déplacement de l'objet virtuel est commandé en commande relative. Dans tous ces cas de commande relative, et parce que le périphérique utilisé était isométrique ou élastique, l'utilisateur recevait une réaction mécanique inhérente à son action de pression sur le périphérique.

Après avoir étudié une solution utilisant une commande en vitesse au Chapitre précédent, nous envisageons ici une commande en position. Pour la commande en position, il n'y a pas de forces de réaction inhérentes à l'action de l'utilisateur puisque celui-ci effectue un mouvement libre dans l'espace. Une autre action de l'utilisateur est nécessaire pour provoquer une réaction passive d'un système. Au Chapitre précédent, nous avons proposé un périphérique en commande absolue, renvoyant des forces *internes*. Dans ce cas, l'utilisateur recevait des forces de réaction d'une balle en mousse qu'il tenait dans le creux de la main. Son action de pression sur la balle en mousse était l'action nécessaire à l'existence de forces de réaction *internes*.

Pour le périphérique recherché ici, nous proposons que cette action supplémentaire soit également une pression sur le périphérique, mais nous cherchons de surcroît à ce qu'elle provoque des forces de réaction *externes*, c'est à dire que le mouvement de l'utilisateur soit contraint par rapport au sol. Dans la section suivante, nous proposons un système répondant à cette problématique.

5.2 Principe du retour d'effort proposé

Nous proposons un système dissipatif, freinant les mouvements de l'utilisateur. Les systèmes dissipatifs décrits au Chapitre 1 utilisent des moteurs commandés par ordinateur pour freiner les mouvements de l'utilisateur. Le système que nous proposons est dissipatif au sens où il freine également les mouvements de l'utilisateur.

Contrairement aux solutions avec moteurs contrôlés par ordinateur, la source d'énergie que nous envisageons pour le freinage est l'utilisateur lui-même, c'est pourquoi nous proposons le terme de retour haptique *auto-contraint*.

La méthode de retour passif que nous cherchons à employer est, comme pour l'ensemble des méthodes de retour passif décrites dans ce mémoire, basée sur une interaction entre les sens

de la vue et du toucher. Comme nous l'avons exposé au Chapitre 4, cette méthode de retour passif se compose de deux éléments :

- le retour visuel
- la réaction mécanique aux actions de l'utilisateur

Pour le *retour visuel*, nous utilisons le même principe que dans les méthodes précédentes, c'est à dire le contrôle du gain de déplacement de l'objet dans les zones dont nous voulons simuler les propriétés de viscosité¹ ou de frottement. L'utilisateur peut voir visuellement l'objet qu'il contrôle ralentir dans les zones visqueuses ou "collante", et revenir à un déplacement normal -le gain unité entre les déplacements de l'utilisateur et ceux de l'objet- lorsqu'il en sort.

Le principe du retour d'effort est de requérir de l'utilisateur une pression sur le périphérique lorsque l'objet rentre dans une zone visqueuse, cette action a deux conséquences :

- 1) lui permettre de reprendre un contrôle normal sur l'objet, c'est à dire avec un gain unité,
- 2) freiner ses mouvements dans l'espace.

La pression requise pour reprendre un contrôle normal de l'objet est le paramètre, contrôlé par la simulation, qui nous permet de simuler différentes viscosités. Pour simuler une grande viscosité, l'application requiert une forte pression sur le périphérique, ce qui a pour conséquence de freiner fortement l'utilisateur lorsqu'il meut l'objet dans la zone visqueuse. Au contraire, pour simuler une viscosité moindre, l'application ne requiert qu'une légère pression sur le périphérique pour reprendre le contrôle de l'objet, la contrainte sur les mouvements du freinage résultant est moindre. Le principe proposé est illustré sur les Figures 5.1 et 5.2.

Nous devons chercher un moyen pour qu'il y'ait une *réaction mécanique* passive du périphérique, proportionnelle à l'action de pression de l'utilisateur sur le périphérique, freinant ses mouvements dans l'espace de travail.

Nous cherchons à simuler des forces de type frottement ou viscosité s'appliquant sur un objet virtuel déplacé par l'utilisateur dans l'espace virtuel. Nous visons dans un premier temps ces situations simples. Elle sont simples dans la mesure où lorsque l'utilisateur déplace l'objet dans ces zones la contrainte s'opposant au mouvement est la même dans toutes les directions : en d'autres termes nous simulons dans un premier temps des milieux virtuels *isotropes*.

5.2.1 Solution technique

Le *retour visuel* ne pose pas de problème technique, il s'agit de permettre à l'utilisateur de contrôler le déplacement d'un objet virtuel dans l'espace ou le plan. Pour cela, l'objet affiché suit les mouvements du périphérique maintenu par l'utilisateur, contenant un système de

¹La viscosité dont nous parlons dans cette expérience n'est pas basée sur un modèle physique de viscosité, nous utilisons ce terme par analogie visuelle à une viscosité réelle, les objets ralentissant comme dans un liquide visqueux

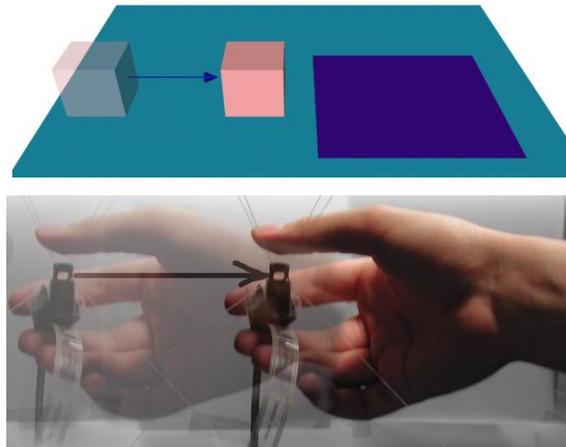


FIG. 5.1 – Déplacement hors contrainte. Lorsque l'objet virtuel est hors contrainte, l'utilisateur n'a pas à appuyer sur le périphérique pour réussir à le déplacer librement, et ses mouvements ne sont pas contraints par le périphérique

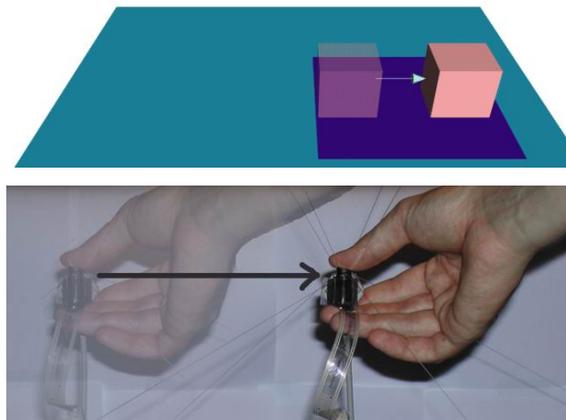


FIG. 5.2 – Déplacement contraint. Lorsque l'objet manipulé rentre dans une zone visqueuse, le gain visuel de déplacement de l'objet décroît, pour reprendre un contrôle normal sur l'objet, c'est à dire avoir un gain unité, l'utilisateur doit appuyer sur le périphérique, ceci a pour conséquence de freiner ses mouvements.

tracking. Un capteur de force est intégré au périphérique, l'utilisateur doit appuyer sur le périphérique pour augmenter le gain de déplacement lorsque l'objet contrôlé rentre dans une zone visqueuse. Le capteur de forces mesure cette pression et augmente le gain de déplacement de l'objet jusqu'à atteindre le gain unité lorsque la pression est suffisante.

Pour la *réaction mécanique* du périphérique, nous voulons ne pas utiliser d'actionneurs ou de moteurs contrôlés par ordinateur. Dans cette situation, la seule source d'énergie est l'utilisateur lui-même. L'idée que nous allons essayer de mettre en oeuvre dans ces travaux est que l'utilisateur lui-même crée la contrainte mécanique qui freine ses mouvements dans l'espace de travail. Nous cherchons à ce que l'utilisateur soit ralenti, freiné dans ses mouvements lorsque l'objet qu'il manipule pénètre dans une zone visqueuse.

Il s'agit donc de mettre en place un périphérique de freinage, à trois dimensions, qui suit l'utilisateur dans ses mouvements, et qui freine les mouvements de l'utilisateur dès que celui-ci presse sur le périphérique.

Nous proposons tout d'abord au paragraphe suivant une solution à une dimension à ce problème, que nous étendons ensuite à deux puis trois dimensions.

5.2.1.1 Solution à une dimension

Faire de la bicyclette est une situation réelle où il arrive souvent que nous soyons à l'origine du freinage de notre propre mouvement, hormis les situations de chute.

En effet, l'appui sur les leviers de freins actionne les mâchoires des freins dont les patins enserrant la jante de la roue, ce qui provoque le freinage progressif. L'intensité de la décélération et de la transformation de l'énergie cinétique en énergie thermique dissipée dans les freins et la jante est proportionnelle à la pression du cycliste sur les leviers de freinage. Nous allons nous inspirer de cette situation réelle pour proposer un système de contraintes en 3 dimensions.

Dans un premier temps nous proposons une solution de freinage à une dimension, nous reprenons l'élément principal de freinage de la bicyclette : les patins de freinage.

Pour permettre à l'utilisateur de déplacer le périphérique le long d'une droite tout en permettant de freiner son mouvement lorsqu'il exerce une pression, nous proposons le dispositif suivant : un fil est tendu, fixé à ses deux extrémités, dans l'espace de travail. Le périphérique peut se mouvoir le long de ce fil, il est constitué de trois éléments :

1. un système de suivi de mouvements
2. un système de freinage basé sur le principe des patins, pinçant le fil lorsque l'utilisateur appuie sur le système.
3. un capteur d'effort²

²système FlexiforceTMELFTM, Sensor B101-L [6]

Le principe du système de freinage est illustré en Figure 5.3.

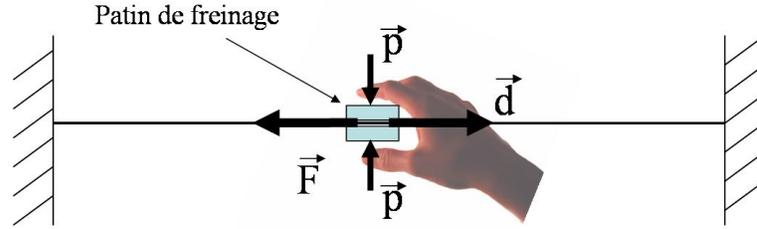


FIG. 5.3 – Solution à une dimension pour le freinage du mouvement de l'utilisateur. L'utilisateur applique une force \vec{p} sur le système de freinage, et ressent une force de frottement \vec{F} au cours de son déplacement \vec{d} . Les fils étant fixés à une structure reliée au sol, l'utilisateur peut ressentir des forces externes

En ce qui concerne la mesure de la pression, l'effet de la pression de l'utilisateur est continu : nous avons utilisé toute l'échelle de pression du capteur de force (Flexiforce), avec une résolution de 512 niveaux de pression.

L'équation 5.1 donne le déplacement de l'objet en fonction du déplacement de l'utilisateur. Pour chaque pas de la simulation, $\Delta\vec{d}_{objet}$ est la translation de l'objet virtuel, s est la viscosité virtuelle, p est le niveau de pression mesuré sur le flexiforce, $\Delta\vec{d}_{utilisateur}$ est un vecteur normalisé qui représente la direction de déplacement de l'utilisateur.

$$\Delta\vec{d}_{objet} = s^{-1} \cdot p \cdot \Delta\vec{d}_{utilisateur} \quad (5.1)$$

5.2.1.2 Solution à deux dimensions

La solution à deux dimensions consiste à utiliser deux câbles, sur le même principe que la solution à une dimension. Deux câbles sont croisés et passent dans le système de freinage, leurs extrémités sont placées de manière à ce que l'espace de travail soit le plus grand possible (Figure 5.4).

Cependant, si on fixe les deux extrémités de chaque câble, le périphérique ne peut pas se déplacer loin de la position centrale. Utiliser des câbles fixés à leur deux extrémités limite la surface utile du périphérique (Figure 5.5). En effet, le périphérique ne peut s'éloigner de la position centrale que dans la mesure où l'extension mécanique des câbles le permet. Les câbles étant choisis pour leur faible extension mécanique, afin de renvoyer les contraintes les

plus rigides possibles, la surface utile est faible dans le cas présenté en figure 5.4 où les deux extrémités de chaque fil sont fixées.

Nous devons donc trouver un moyen de permettre au périphérique d'atteindre une plus grande surface lors du déplacement dans l'espace de travail tout en permettant une réaction externe en forces sur la main de l'utilisateur. La solution que nous proposons est de fixer une seule extrémité de chaque câble, et de relier l'autre extrémité à un système d'enroulement (voir Figure 5.6).

Ainsi, lorsque l'utilisateur s'éloigne de la position centrale, l'enrouleur permet d'adapter la longueur des fils et permet d'emmener le périphérique dans tout l'espace de travail. Si l'utilisateur appuie sur le périphérique, le freinage est assuré dans toutes les directions, car les deux extrémités fixes des câbles sont fixées en quinconce et permettent une résistance au mouvement dans toutes les directions du plan.

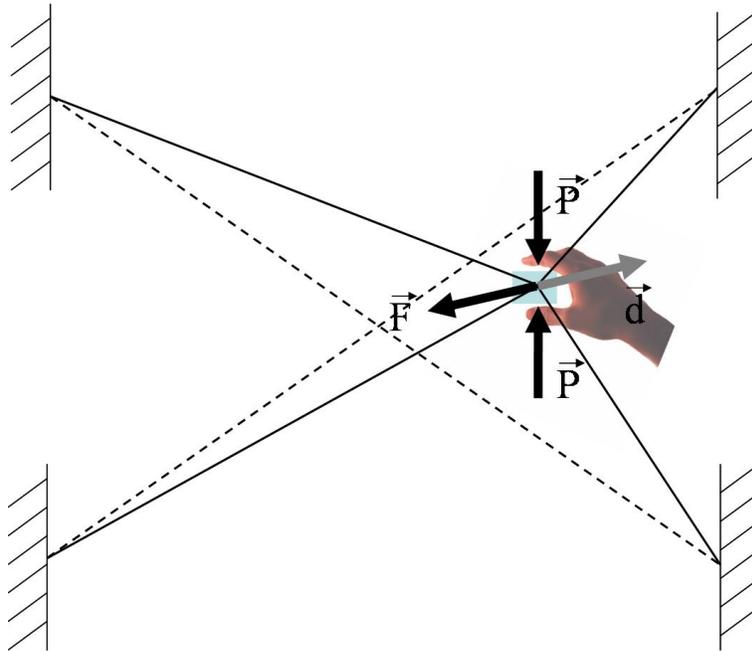


FIG. 5.4 – Première solution de freinage à 2 dimensions.

5.2.1.3 Solution à trois dimensions

La solution à trois dimensions est l'extension logique de la solution à deux dimensions, nous avons gardé le principe des enrouleurs, 4 câbles passent au travers du système de freinage du périphérique, une seule extrémité de chaque câble est fixée, l'autre est reliée à un enrouleur (Figure 5.7). Les quatre extrémités fixées se trouvent en des coins opposés d'un quadrilatère

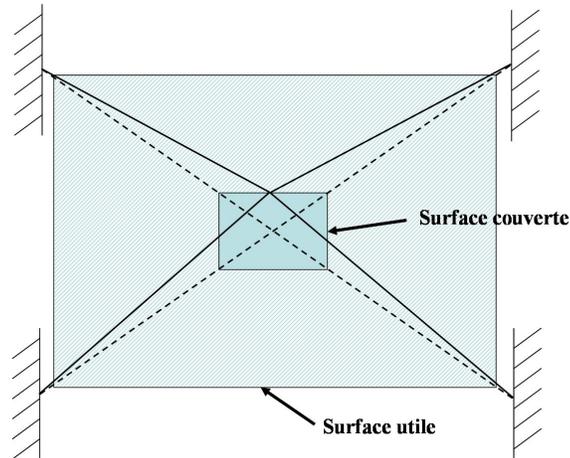


FIG. 5.5 – L'extrémité des fils étant fixe leur longueur est fixée aussi à leur extensibilité mécanique près. De ce fait la surface effectivement couverte par le périphérique est faible (surface couverte), alors que nous cherchons à ce qu'elle s'étende sur tout l'espace de travail (surface utile)

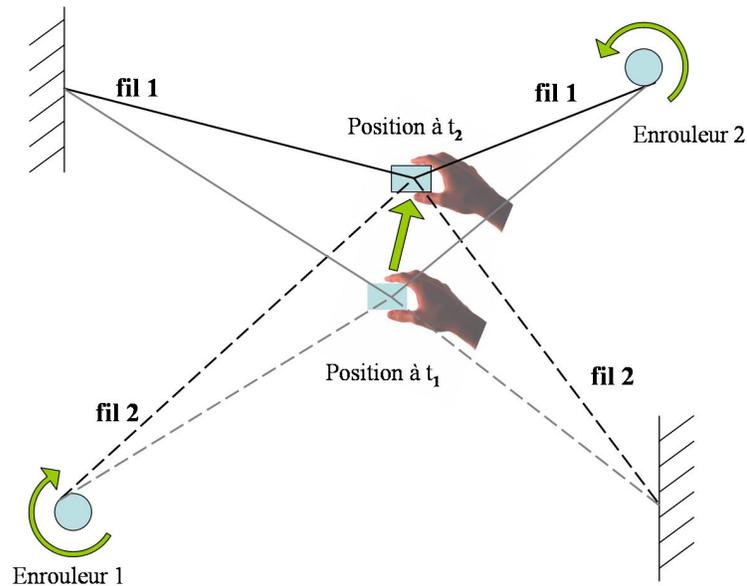


FIG. 5.6 – Solution 2D avec enrouleurs : le problème posé par la longueur fixe des fils dans la version précédente est résolu en ne fixant qu'une extrémité du fil, l'autre extrémité est attaché à un système à enroulement permettant de faire varier la longueur du fil afin d'étendre la surface couverte par le périphérique. Le retour de forces externes reste assuré par l'extrémité du fil reliée à la structure fixe

et permettent une résistance au mouvement dans toutes les directions.

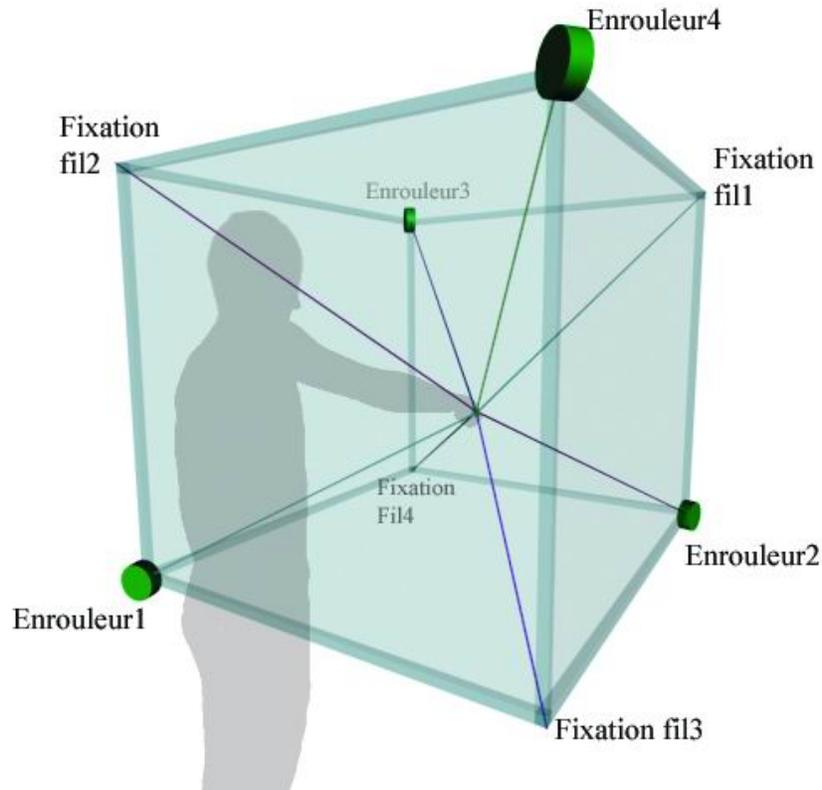


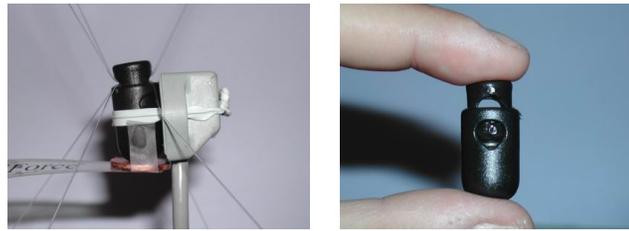
FIG. 5.7 – Vue schématique du système à 3 dimensions. Quatre fils sont attachés à quatre coins d’une structure cubique et peuvent s’enrouler et se dérouler du côté opposé grâce à un système à enrouleur.

5.3 Evaluation du système

5.3.1 Méthode

Pour évaluer le système nous avons proposé à un ensemble de sujets une tâche de discrimination de viscosité virtuelle. La tâche proposée consiste à comparer les viscosités virtuelles de deux zones différentes placées sur un plan virtuel, pour interagir avec la scène, l'utilisateur peut déplacer un cube sur le plan (voir Figure 5.10). Les mouvements du cube sont libres en tout point du plan, sauf dans les zones visqueuses où ils sont contraints par une "viscosité" virtuelle.

L'expérience a consisté en deux sessions. Une session est purement visuelle, sans recours à la pression sur le périphérique (session visuelle), durant l'autre session les sujets utilisent le



(a) Le périphérique de retour d'effort passif.

(b) L'élément de freinage

FIG. 5.8 – Le périphérique de retour d'effort passif est composé d'un capteur de position magnétique, d'un capteur de force et d'un élément de freinage



FIG. 5.9 – Première version à 3 dimensions du système, installé face à un écran. Une structure métallique maintient les fils et les enrouleurs. Le périphérique se trouve au croisement des 4 fils.

périphérique proposé (session avec pression).

Pour minimiser les effets d'ordre, la moitié des sujets a effectué la session visuelle en premier, l'autre moitié a commencé avec la session avec pression. Pour la session visuelle, le même périphérique a été utilisé, mais l'effet de la pression sur le périphérique a été annulé, et nous avons indiqué aux sujets de ne pas appliquer de pression sur le périphérique, mais simplement d'utiliser le déplacement. Pour la session visuelle, la seule information était le ralentissement du cube manipulé dans les zones contraintes.

L'expérience suit une méthode de mesures répétées, avec un paradigme de choix forcé. Les sujets ont eu à effectuer un ensemble de tâches de comparaison. La zone de gauche était la zone de référence, sa viscosité était constante tout au long des tests voir Figure 5.10. La viscosité de la zone de droite (zone de comparaison) variait de -30%, -20%, -10%, 10%, 20% et 30% de la viscosité de la zone de référence, résultant en 6 paires de comparaisons. Chaque paire de comparaisons était présentée 3 fois, représentant 18 tâches de comparaison par session. L'ensemble des paires était présentée dans un ordre aléatoire. Pour chaque test, le sujet devait décider laquelle des deux zones lui paraissait la plus visqueuse.

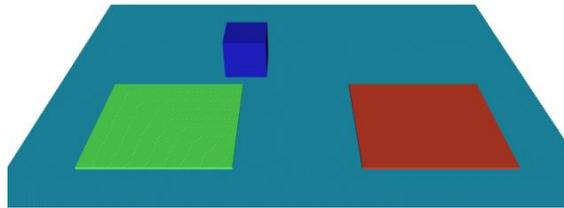


FIG. 5.10 – Retour visuel présenté lors de la tâche de discrimination : l'utilisateur déplace un cube sur un plan, la tâche consiste à comparer la viscosité virtuelle des deux zones sur le plan. La zone de gauche est la référence et ne change pas de viscosité au cours des tests. La zone de droite est la zone de comparaison, sa viscosité varie de -30% à +30% de la référence au cours des tests. La.

Aucune d'indications quant à l'exactitude des réponses n'est fournie au cours du test. L'opérateur a saisi la réponse au cours des deux sessions, celles-ci sont enregistrées, de même que d'autres données spécifiées en Section 5.3.2.

5.3.2 Indicateurs de performance

Les indicateurs que nous avons utilisé pour décrire les performances sont :

Score Le score total est le nombre de réponses correctes données par l'ensemble des utilisateurs, considérant que la référence pour chaque réponse est la relation entre la viscosité de référence, et la viscosité comparée.

Temps de réponse Le temps de réponse est le temps écoulé entre la présentation de la paire de comparaisons et la réponse de l'utilisateur.

JND (Just Noticeable Difference) Nous avons suivi la méthode usuelle décrite en [35] pour calculer le JND et le Point d'égalisation subjective (PSE). Les réponses des sujets ont été additionnées et ont permis de tracer la fonction psychométrique pour chaque session : session visuelle et session avec pression. La fonction psychométrique représente la proportion des réponses "la zone de comparaison est plus visqueuse", en fonction de la viscosité de comparaison. Nous avons fait l'hypothèse, couramment utilisée dans ce type de tests, que la fonction psychométrique suit une loi normale de moyenne 0 et d'écart type 1. Dans cette hypothèse, la transformée en z (loi normale inverse) de la fonction psychométrique donne une fonction linéaire. Les paramètres usuels (JND PSE) sont calculés en utilisant une régression linéaire de la transformée en z. La fraction de Weber est le JND divisé par l'intensité du stimulus de référence (valeur de la viscosité de référence), la littérature assimile parfois la fraction de Weber au JND, ce que nous ferons dans ce mémoire. Le PSE est calculé pour une proportion de 50% de réponses "la zone de comparaison est la plus visqueuse", interprété comme des réponses aléatoires (probabilité = 0.5).

Mesure des forces appliquées sur le périphérique Pour chercher à mesurer si les forces appliquées sur le système sont cohérentes avec la viscosité simulée, nous avons enregistré l'ensemble des données de pression sur le périphérique au cours de tests.

Commentaires des utilisateurs Deux questions ont été posées aux utilisateurs : Avez-vous ressenti des forces pendant les tests. Quelle session vous a t'elle le mieux renseigné sur les forces ?

5.3.3 Participants

Dix-huit sujets ont participé à l'expérience, seize hommes et deux femmes, âgés de 20 à 29 ans, Deux étaient gauchers, seize droitiers. Le temps moyen passé par les sujets sur l'expérience était approximativement de 20 minutes.

5.3.4 Résultats

Score Le tableau 5.1 résume les scores, trois scores sont présentés : le score total, le score correspondant aux situations où la viscosité de comparaison est inférieure à celle de référence, et le score correspondant aux situations où la viscosité de comparaison est supérieure à celle de référence.

Temps de réponse Le temps de réponse moyen était de 27.3s pour la session visuelle et de 28.05s pour la session avec pression. La Figure 5.12 montre les temps de réponse.

	Session visuelle	Session avec périphérique	test χ^2
score total	69.7%	77.4%	significatif $\chi^2(1)=4.363$ p=0.0367
pour comp.<ref.	68.4%	87.2%	significatif $\chi^2(1)=15.53$ p=0.0367
pour comp.>ref.	70.9%	67.5%	non significatif $\chi^2(1)=0.4$ p=0.526

TAB. 5.1 – Score (% de réponses correctes) : **1)** Total, **2)** pour viscosité de comparaison<viscosité de référence et **3)** pour viscosité de comparaison>viscosité de référence

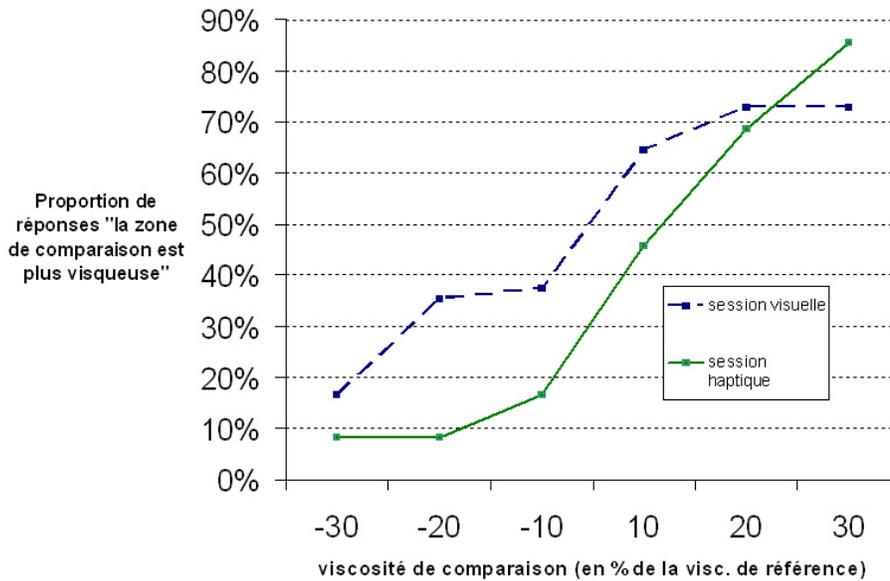


FIG. 5.11 – Pourcentage des réponses "la zone de comparaison est plus visqueuse" en fonction de la viscosité de comparaison présentée.

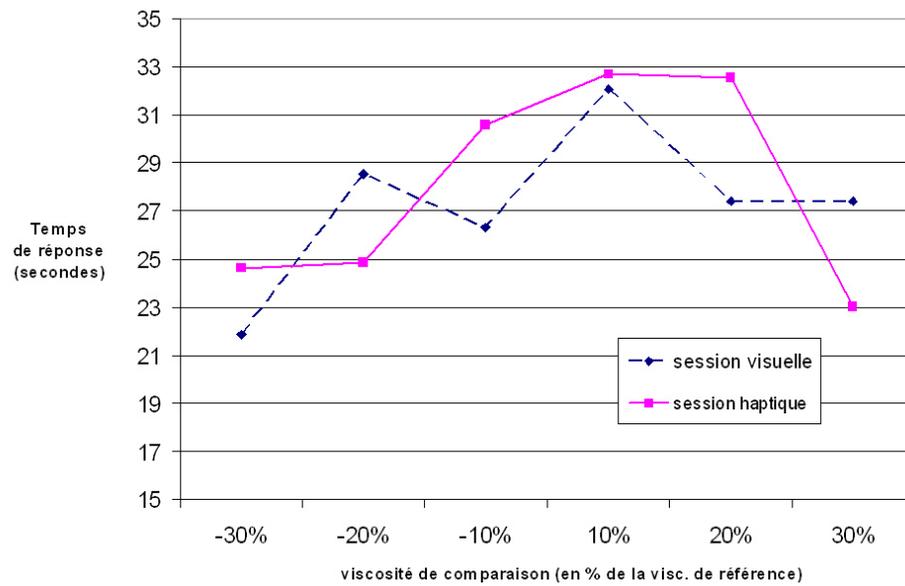


FIG. 5.12 – Temps moyens de réponse pour chaque paire de comparaisons

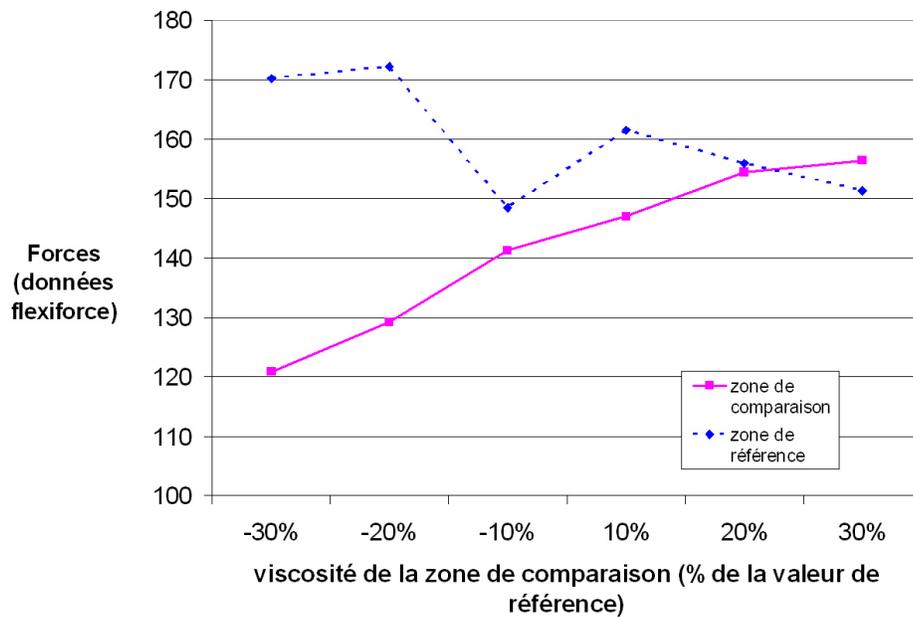


FIG. 5.13 – Forces moyennes appliquées sur le périphérique, durant la session avec pression, lors du passage sur les zones de référence et comparaison.

JND et PSE Le JND et le PSE sont calculés sur la base des fonctions psychométriques (Figure 5.11). Le JND pour la session visuelle est de 25.8% et pour la session avec pression le JND calculé est égal à 22.8%. Les PSE calculés sont respectivement de 1.13 and 1, 23 pour une valeur de référence de 1.125. Ces PSE correspondent à des surestimations de de 0.4% et 9%.

Forces appliquées sur le périphérique La Figure 5.13 montre les forces moyennes appliquées lors du passage dans les zones de référence et de comparaison.

Commentaires de utilisateurs Question 1) : 12 sujets ont répondu avoir ressenti des forces lors de la session avec pression, les 6 sujets restant ne mentionnant pas ressentir des forces réalistes, mais plutôt des sensations basées sur le retour visuel.

Question 2) : 9 personnes ont répondu avoir l'impression d'avoir mieux répondu au cours de la session avec pression, 8 personnes durant la session visuelle, une personne n'a pas noté de différence.

5.4 Discussion des résultats

5.4.1 Scores

Appelons *variation positive* les cas où la viscosité de la zone de comparaison est supérieure à celle de la zone de référence (cas 10% 20% 30%), et *variation négative* les cas où celle-ci est inférieure (cas -10% -20% -30%).

Pour les cas de *variation négative*, les performances de utilisateurs en termes de score sont meilleures pour la session avec le périphérique comparativement à la session purement visuelle (voir tableau 5.1).

Pour les cas de *variation positive*, les performances de utilisateurs en termes de score ne sont pas significativement différentes entre la session visuelle et la session avec pression.

Ce résultat peut s'expliquer en observant la courbe des forces appliquées : en effet, pour les variations positives, les forces renvoyées à l'utilisateur sur la zone de comparaison et la zone de référence sont assez proches, contrairement à la variation négative, où les différences forces comparaison- forces références, sont plus franches et peuvent expliquer le score supérieur pour les variations négatives par rapport aux variations positives.

5.4.2 Temps de réponse

Pour les deux sessions, plus la valeur de comparaison est proche de la valeur de référence, plus le temps de réponse est grand (Figure 5.12). L'écart type tend à montrer que cette

tendance est plus stable pour la session avec pression, et suggère que le périphérique passif proposé ajoute de la stabilité dans le temps de réponse lors de l'estimation des forces.

5.4.3 JND

Le système améliore la résolution, en termes de JND, des utilisateurs. Ce résultat tend à montrer que le périphérique proposé apporte une information additionnelle comparativement à la session visuelle. Les résultats de *score* et de *forces appliquées* renforcent l'idée que cette information additionnelle est de nature haptique, les réponses correctes est en accord avec l'information de forces appliquées.

La résolution constatée des utilisateurs est améliorée avec le périphérique passif, comme le montre la valeur inférieure du JND (il passe de 25,8% à 22,8%). Cependant, puisque ce JND est calculé sur la base des scores observés (fonction psychométrique) et que ce score ne présente pas de différences significatives entre la session visuelle et la session avec pression, ce résultat en résolution (JND) est susceptible de s'améliorer d'avantage si le retour d'effort est amélioré pour les variations positives (valeur de comparaison supérieure à la valeur de référence).

Les travaux de Jones et Hunter [52] ont étudié la perception de la raideur réelle. Ils ont fait comparer à dix sujets des raideurs réelles contrôlées par deux moteurs, reliés chacun à un des poignets du sujet. Chaque sujet devait effectuer une tâche d'égalisation d'une raideur de comparaison, perçue en déplaçant son bras droit, à la raideur de référence perçue dans le bras gauche. Le JND obtenu pour ce stimulus de raideur est de 23%.

L'expérience effectuée ici n'est pas directement comparable avec ceux de Jones et Hunter, leur expérience a mis en jeu une comparaison de raideurs entre les deux bras, les sujets étaient en mesure de percevoir simultanément les deux stimuli, de référence et de comparaison. Dans l'évaluation du périphérique proposé dans ce Chapitre, la tâche met en jeu un seul bras, et les utilisateurs comparent les deux zones visqueuses l'une après l'autre. Cependant nous pouvons noter la proximité des résultats de cette expérience, le JND est de 22,3%, avec ceux de Jones avec un JND de 23%.

5.4.4 Forces appliquées

Les résultats des mesures des forces appliquées (Figure 5.13) sur le système montrent que les forces appliquées sont proportionnelles à l'intensité de la propriété physique simulée, dans le cas de cette expérience de simulation d'une "viscosité" ou raideur virtuelle. Le système est conçu de façon à ce que la pression appliquée provoque des forces de frottement s'opposant au déplacement, l'utilisateur ressent donc des frottements réels proportionnels à la viscosité simulée de la surface testée.

La courbe des forces moyennes (Figure 5.13) appliquées sur le périphérique sur la zone de

comparaison dont la viscosité varie de -30% à +30% de la valeur de référence montre que plus la viscosité virtuelle est grande, plus les utilisateurs appuient sur le périphérique. De plus, cette relation entre la force que nous cherchons à simuler et la force effectivement retournée à l'utilisateur est proche d'une fonction linéaire ($R^2 = 0.9624$). Quatorze des dix-huit sujets présentent des courbes de forces similaires dont les régressions linéaires avec des valeurs de corrélation (R^2) comprises entre 0.76 and 0.91.

Un biais dans l'estimation des forces pourrait être introduit par la tension des fils. En effet, les enrouleurs se comportent comme des ressorts, et lorsque le périphérique s'éloigne de la position centrale, une force de traction tend à le ramener vers le point origine.

Lors de l'expérience, nous avons cherché à réduire ces effets selon deux méthodes. Tout d'abord, nous avons placé les zones de façon symétrique autour de la position centrale du périphérique, ensuite, nous avons choisi les contraintes virtuelles de façon à ce que les forces de frottement résultant de l'utilisation du périphérique soient largement supérieures aux forces induites par la tension des fils.

5.5 Installation et essais du système sur le Plan de Travail Virtuel

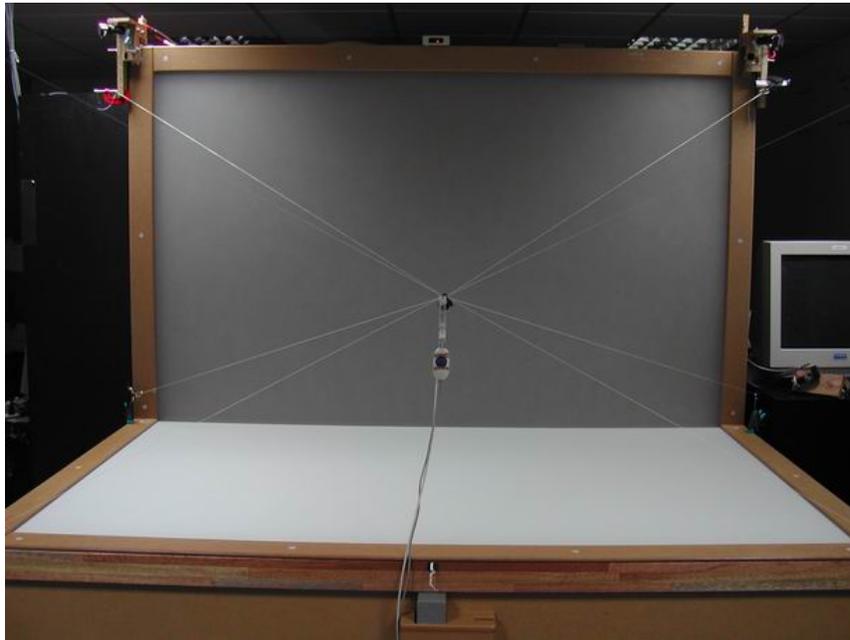
Nous avons mis en oeuvre une version du système sur le Plan de Travail Virtuel, l'installation n'a pas posé de problèmes majeurs, la seule différence par rapport au système 3D non immersif a été la longueur supérieure des câbles. La Figure 5.14 montre le système installé sur le PTV.

5.5.1 Essais informels

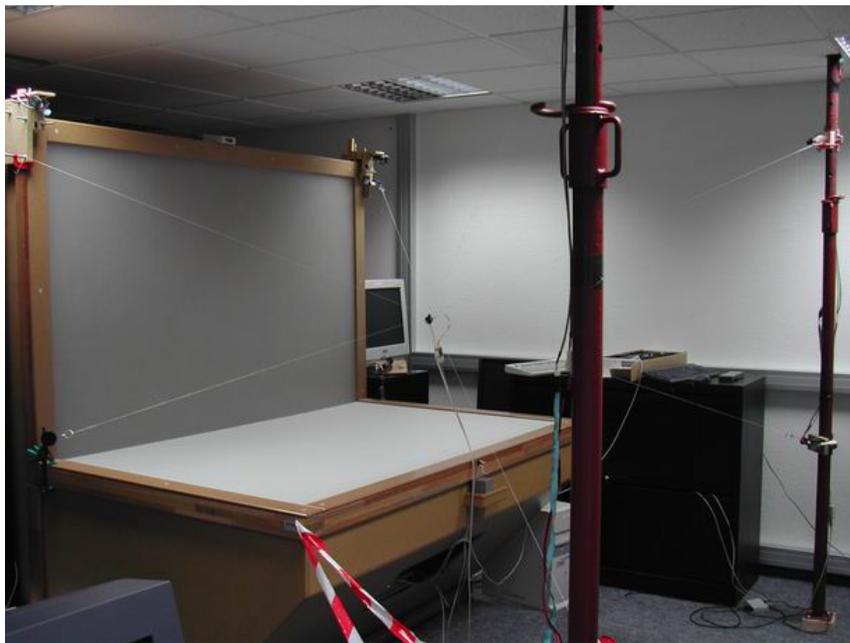
La différence entre la version 3D du périphérique, que nous avons testée dans la Section 5.3, et celle que nous avons intégrée sur le PTV est le niveau d'immersion. Sur le PTV, la manipulation directe des objets est possible, la visualisation est stéréoscopique et l'espace de travail plus grand.

Nous avons effectué quelques tests informels sur ce dispositif intégré sur le PTV. La simulation a mis en jeu la manipulation d'un objet au travers de zones ralentissant plus ou moins les mouvements de l'utilisateur. Contrairement à la tâche mise en jeu dans l'évaluation du périphérique en environnement non immersif, décrite en Section 5.3 pour laquelle l'objet se déplaçait dans un plan, l'objet était libre de tout mouvement dans l'espace (voir Figure 5.15).

Les utilisateurs ont facilement reconnu les différences de propriétés entre une zone de référence et une zone de comparaison. Le système de câbles a permis de retourner aux utilisateurs des forces externes qui, d'après leur commentaires rajoutent une dimension de réalisme et de facilité de perception des forces par rapport à une situation sans les câbles. En effet, nous avons comparé le système dans sa version complète, avec câbles, permettant un retour de

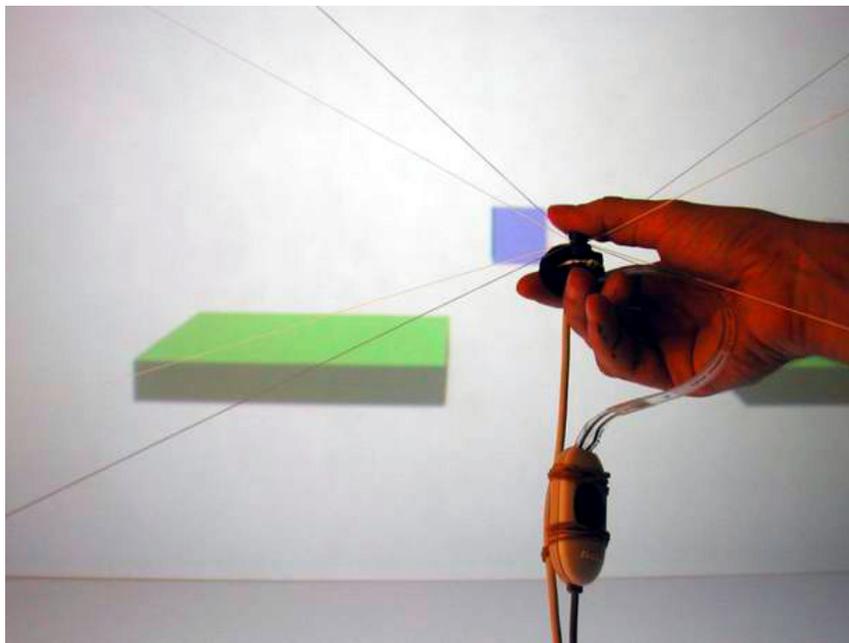


(a) vue de face

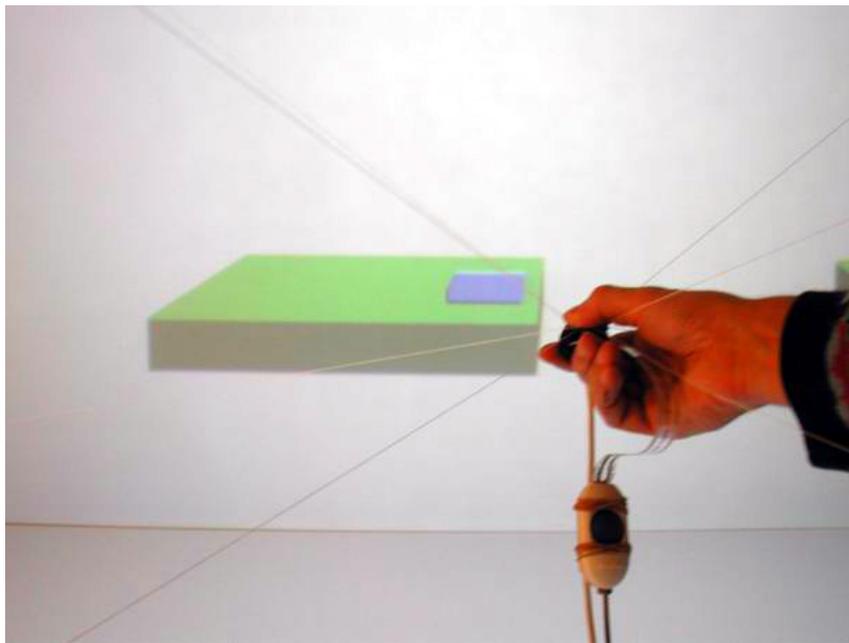


(b) vue de côté

FIG. 5.14 – Installation du système passif *auto-contraint* sur le plan de travail virtuel



(a) Objet manipulé hors contrainte



(b) Objet manipulé dans une zone "visqueuse"

FIG. 5.15 – Deux situations de manipulation avec le périphérique auto-contraint sur le PTV

forces externes, et une version pour laquelle le périphérique était désolidarisé des câbles et ne renvoyait pas de forces externes. Les utilisateurs ont indiqué une nette préférence pour le système complet, avec câbles et forces externes, et mentionné une meilleure sensation des forces.

L'amélioration des sensations constatée sur la version du système installée sur le PTV peut provenir du caractère plus immersif de la visualisation, et de la possibilité de manipulation directe. Nous avons observé que, bien que dans les cas où l'objet était contraint, et pouvait s'éloigner de la main du fait du changement de gain de déplacement, les utilisateurs appliquaient une pression telle que l'objet restait proche de leur main en manipulation directe.

Des études formelles sont à envisager pour confirmer ces résultats, notamment concernant l'amélioration du JND avec le périphérique constatée sur la version non immersive, peut-elle se confirmer sur le PTV ? La résolution de perception peut-elle être supérieure dans la version sur le PTV ?

5.6 Perspectives

5.6.1 Isotropie, anisotropie

Pour une pression donnée de l'utilisateur sur le périphérique, la contrainte résultante est de même intensité dans toutes les directions. Donc, pour une pression donnée, le milieu virtuel simulé est *isotrope*.

Nous pourrions envisager une expérience afin de voir si le système peut simuler des milieux *anisotropes*, en contrôlant le gain visuel suivant la direction de déplacement. Pour cela, l'utilisateur doit se laisser influencer par les variations de gain visuel suivant les directions, et moduler sa pression sur le périphérique en conséquence.

5.6.2 Comparaison avec des propriétés réelles

Pour poursuivre l'évaluation de ce périphérique de retour d'effort, on peut chercher à évaluer si le retour d'effort produit peut permettre de renvoyer des forces comparables à des forces réelles. Nous pourrions par exemple présenter à un ensemble de sujets un objet réel ayant une propriété physique comme la viscosité, et de les faire comparer à une viscosité virtuelle simulée au travers du périphérique proposé.

Le problème principal qui se pose pour la mise en place d'une telle comparaison est celui de la calibration. Dans le cas des évaluations pour le retour pseudo-haptique comparant des ressorts réels et des ressorts virtuels, la calibration du système est faite grâce à une mesure sur les ressorts réels et une calibration du périphérique d'entrée afin que les déplacements du ressort virtuel simulé soit en accord avec le couple appliqué par l'utilisateur et la raideur simulée.

Dans le cas de la simulation d'une zone visqueuse ou d'une zone de frottements, la calibration est moins évidente. Comment calibrer une zone de frottements réelle, et comment simuler

une telle zone virtuelle afin que les propriétés puissent éventuellement être comparables.

5.6.3 Applications

Au vu des résultats en performance ainsi qu'en forces retournées, le système semble adapté à retourner des informations haptiques, par exemple simuler un champ électromagnétique variant dans l'espace dans le cadre d'une simulation de visualisation scientifique. Une autre application envisageable serait simuler des compliances différentes d'objets d'un catalogue d'achat en ligne, permettant à l'acheteur d'apprécier physiquement l'objet.

Conclusion

Nous avons proposé dans ce Chapitre un périphérique de retour d'effort passif d'un type nouveau, utilisable dans un grand espace de travail et permettant de retourner des forces externes à l'utilisateur. Ce périphérique, que nous avons appelé périphérique *auto-constraint* est mobile et en commande absolue. Grâce à un système de câbles et un retour visuel adéquat, l'utilisateur fournit lui même l'énergie pour la création des contraintes.

Une expérience d'évaluation sur dix-huit sujets a été menée sur une version à trois dimensions du système avec une visualisation non immersive. L'évaluation a porté sur une tâche de discrimination de contraintes entre deux zones virtuelles ayant des propriétés différentes. Les résultats ont montré que le système a amélioré les performances de utilisateurs, comparativement à une situation pour laquelle aucune information haptique n'était disponible. Les performances ont été meilleures en termes de score, ainsi que pour la résolution de perception d'une propriété de viscosité virtuelle.

Les forces mesurées sur le périphérique montrent que les contraintes retournées à l'utilisateur sont en moyenne proportionnelles à la propriété physique simulée.

Enfin, nous avons mis en place une version immersive du système que nous avons porté sur le Plan de Travail Virtuel et qui a donné lieu à des tests informels. Les utilisateurs font état de sensations intuitives et ont facilement effectué une tâche de différentiation de raideurs entre deux zones virtuelles affichées sur le PTV. Dans cette version immersive, nous avons noté que les utilisateurs ont eu tendance à manipuler l'objet en direct, c'est à dire adapter la pression sur le périphérique lors du passage dans les zones contraintes, afin de rester en manipulation directe.

L'adaptation de la pression aux contraintes visuelles est à la base du fonctionnement de ce périphérique et elle permet aussi la manipulation directe, ce que les utilisateurs semblent effectuer de façon intuitive.

Chapitre 6

Interaction coopérative

Nous revenons, dans ce Chapitre, sur la solution d'un périphérique mobile en commande relative, identique à celle proposée au Chapitre 4 et nous l'évaluons selon un nouveau critère : l'efficacité de la coopération entre deux utilisateurs sur une tâche commune. Pour l'évaluer, nous proposons, comme dans les expériences précédentes, de comparer cette méthode basée sur une interaction multimodale, à une méthode purement visuelle en déplacement absolu, pour laquelle aucune information de toucher n'est disponible.

La tâche de coopération consiste à déplacer un objet virtuel, de manière à relier différents points prédéfinis dans un plan. Le choix du chemin n'est pas imposé. La trajectoire comprend des phases décisionnelles correspondant à des choix de direction. Pour commander le déplacement de l'objet, deux périphériques sont utilisés, un pour chaque utilisateur.

Pour la méthode que nous voulons évaluer, le périphérique permet à chacune des deux personnes de spécifier une intention de déplacement, en commande relative, sous forme d'une vitesse intentionnelle \vec{v} . L'orientation du périphérique contrôle la direction de \vec{v} , la pression du pouce sur le capteur de force contrôle la norme de \vec{v} . Le mouvement de l'objet est la combinaison linéaire des intentions de déplacement de chaque utilisateur.

Pour la méthode purement visuelle, que nous appellerons commande absolue, les utilisateurs n'appuient plus sur le périphérique, les déplacements de l'objet sont uniquement commandés par les mouvements absolus de la main de chaque utilisateur. La translation résultante de l'objet virtuel est la simple composition des translations instantanées de la main de chaque utilisateur. Dans ce cas, il n'y a pas d'interaction vue/toucher, le toucher n'étant pas mis en jeu dans le contrôle.

Nous cherchons à évaluer dans ce Chapitre si la méthode avec retour passif permet, pour une tâche de déplacement d'objet, une meilleure coopération entre deux utilisateurs comparative-ment à la solution en commande absolue.

Nous avons mené une expérience avec six groupes de deux personnes devant coopérer sur la tâche. Chaque groupe a effectué la tâche en deux sessions : une avec le périphérique passif, l'autre en commande absolue, et pour chaque session les caractéristiques du mouvement ont été enregistrées (mouvements de l'objet mouvements des utilisateurs, pression appliquée sur

le périphérique).

Pour chercher à caractériser l'efficacité lors de la tâche nous proposons :

- une approche globale de l'efficacité de la trajectoire : les boucles et les portions directes dans la trajectoire.
- une approche plus précise : la comparaison des intentions de déplacement des utilisateurs au cours du déplacement

Les résultats montrent que la trajectoire semble plus proche de la trajectoire idéale lors de la manipulation avec le périphérique passif par rapport au mode de commande absolu, et les intentions de déplacement des deux utilisateurs sont plus cohérentes. Ainsi, la commande relative semble plus efficace pour une tâche coopérative que la commande absolue

Introduction

La manipulation d'un objet à deux personnes est une situation commune. Un exemple d'une manipulation coopérative d'un objet dans le monde réel est la situation des déménageurs devant déplacer un meuble en combinant leurs efforts pour diriger celui-ci dans une cage d'escalier ou un couloir comprenant des d'obstacles. Un exemple de ce type de coopération, en environnement virtuel, a été étudié par Hubbard [46] et concerne la coopération entre les deux brancardiers déplaçant un brancard virtuel.

Des études évaluant le retour haptique actif dans des situations de coopération ont été effectuées et ont montré un apport de la technique pour certaines tâches. Citons les travaux de Basdogan et al. [14] qui ont proposé à deux utilisateurs d'effectuer une tâche consistant à faire passer une bague virtuelle le long d'un fil, chacun manipulant un côté de la bague grâce à un bras à retour d'effort PHANTOMTM, permettant à chaque utilisateur de percevoir les forces relatives aux actions de l'autre (Figure 6.1).

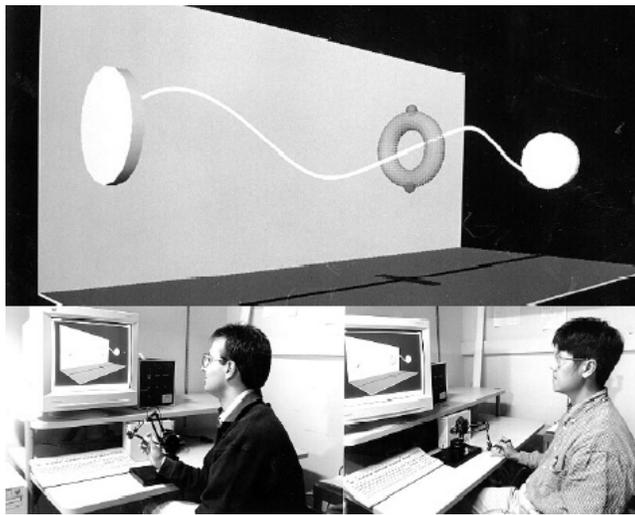


FIG. 6.1 – Tache coopérative de la bague le long d'un fil : deux utilisateurs manipulent une bague le long d'un fil, chacun manipule un côté de la bague à l'aide d'un bras à retour d'effort PHANTOMTM, et chacun peut percevoir les forces appliquées par l'autre utilisateur.

Nous avons dans les Chapitres précédents proposé des méthodes passives de retour d'effort, nous cherchons dans ce Chapitre à évaluer l'apport de l'une d'entre elles dans le cadre d'une tâche coopérative.

Nous proposons de mettre en oeuvre le périphérique proposé au Chapitre 4. Deux utilisateurs doivent effectuer une tâche de déplacement d'un objet, chacun disposant du périphérique proposé. Nous comparons cette situation à une interaction pour laquelle aucune information de

pression n'est utilisée. Afin d'étudier les trajectoires obtenues pour les deux cas de manipulation, nous proposons deux approches : une approche globale, dont l'objectif est d'analyser l'efficacité globale de la trajectoire par rapport à une trajectoire idéale, et une approche locale, comparant les deux intentions de déplacement de chaque utilisateur au cours de la trajectoire.

6.1 Mise en oeuvre du mode relatif avec périphérique mobile en coopératif

Nous cherchons une méthode d'interaction coopérative permettant l'interaction multimodale entre la vue et le toucher, telle qu'elle a été utilisée dans le Chapitre 4. Nous comptons utiliser le même périphérique, dans un cadre coopératif. Cependant le contrôle du retour visuel est différent. Dans le cas mono-utilisateur nous cherchions à simuler des forces dues à la viscosité d'une zone, pour cela, le gain de déplacement de l'objet dans cette zone était réduit par l'application, de façon déterministe, pour provoquer une pression supérieure sur le périphérique. Dans le cas coopératif, le retour visuel est bien un ralentissement, ou une accélération de l'objet contrôlé, mais non pas contrôlée par l'application, mais résultant des actions de l'autre utilisateur.

Pour un utilisateur, un ralentissement de ses actions indique qu'une force opposée à la sienne est appliquée par l'autre utilisateur, une accélération indique que les deux forces ou intentions de mouvements des deux utilisateurs sont convergentes.

Deux périphériques sont utilisés, un pour chaque utilisateur, permettant à chaque personne de spécifier une intention de déplacement sous forme d'un vecteur vitesse \vec{v} . L'orientation du périphérique contrôle la direction de \vec{v} , la pression du pouce sur le capteur de force contrôle la norme de \vec{v} .

Les utilisateurs déplacent ensemble un objet virtuel, le mouvement de l'objet est la combinaison linéaire des intentions de déplacement de chaque utilisateur.

Pour évaluer cette méthode nous proposons de comparer cette technique de coopération qui peut potentiellement permettre une interaction multimodale vue/toucher, à une méthode de coopération ne permettant pas une telle interaction.

Cette méthode de coopération sans composante tactile, que nous appellerons *commande absolue* consiste à utiliser les mouvements absolus de la main de chaque utilisateur. Dans ce cas la translation résultante de l'objet virtuel que les deux utilisateurs manipulent est la simple composition des translations instantanées de chaque utilisateur. Il n'y a pas d'interaction vue/toucher, le toucher n'étant pas mis en jeu dans le contrôle.

Nous exposons dans la section suivante des études préliminaires, menées en environnement virtuel ainsi que des essais de coopération réels, pour chercher à mettre en place une tâche et

un mode de coopération pertinents, c'est à dire mettant en jeu une réelle coopération entre les deux utilisateurs.

6.1.1 Etudes préliminaires

6.1.1.1 Expérience du ballon

Nous avons dans un premier temps mis en place une situation virtuelle simple et inspirée de l'exemple dans le monde réel des déménageurs devant déplacer un meuble en coopération. Il s'agit d'une situation de déplacement d'un objet selon un seul degré de liberté, l'objectif étant simplement de déplacer l'objet d'un point A à un point B.

Chacun des deux utilisateurs appuie sur un périphérique identique à celui exposé au Chapitre 4, ce qui applique une force virtuelle sur un coté de l'objet, les pressions des deux utilisateurs sont disposées de part et d'autre de l'objet et sont en opposition.

Pour inciter les utilisateurs à coopérer, l'objet se comporte comme un ballon de baudruche. Il peut éclater si la pression résultante appliquée par les deux utilisateurs est trop forte, d'autre part, si la résultante des deux forces est trop faible, le ballon peut "s'envoler" et échapper aux utilisateurs. Si les forces sont égales, le ballon ne se déplace pas, si les forces sont inégales, le ballon se déplace dans le sens de la résultante des deux forces. Une information visuelle relative à la résultante des forces appliquées est ajoutée : la déformation du ballon sous l'action des deux utilisateurs. Cette situation est illustrée sur la Figure 6.2.

Lors d'essais sur cette interaction simple entre deux utilisateurs, les utilisateurs ont indiqué ressentir des forces. Nous allons chercher à mettre en place une situation de coopération plus complexe, mettant en jeu une tâche nécessitant une coopération plus soutenue.

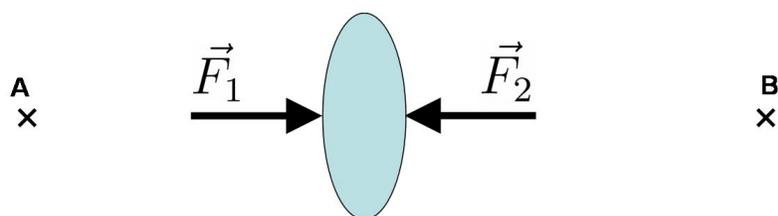
6.1.1.2 Tests de situations réelles

Nous avons effectué des essais de coopération en situation réelle afin de chercher à mettre en place une tâche impliquant une coopération soutenue entre les utilisateurs.

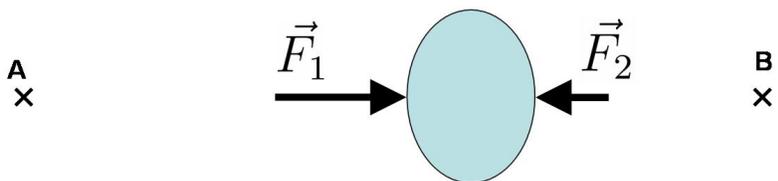
Nous avons testé une situation réelle, à deux personnes, avec une simple boîte, chacune poussant d'un côté de la boîte. Les deux personnes devaient suivre un objectif commun. Deux objectifs ont été testés :

- une consigne de point à atteindre, par exemple "aller vers un point donné de l'espace réel",
- une consigne de mouvement à effectuer, nous avons choisi la consigne commune de "décrire un cercle" avec l'objet.

On se rend compte que lorsque le trajet à effectuer en coopération est connu des deux sujets on y arrive très facilement, que se soient des translations, ou une trajectoire quelconque en 3D (cercles, obliques). Tout se passe comme si la trajectoire est tacitement définie à l'avance et effectuée sans problème.



(a) Forces égales



(b) Forces différentes

FIG. 6.2 – Coopération avec le ballon. Dans le cas où les forces appliquées par les deux utilisateurs sont égales, le ballon ne bouge pas, mais il est déformé proportionnellement à la résultante des forces appliquées. Dans le cas où les forces appliquées sont différentes, le ballon se déplace dans le sens imposé par l'utilisateur appuyant le plus fort des deux.

On peut supposer qu'en virtuel, pour des trajectoires prédéfinies, la tâche soit aussi assez simple. Pour une translation d'un point A vers un point B, la stratégie est tacitement et immédiatement définie : un des utilisateurs va se "laisser faire" et n'appuyer que très légèrement sur le cube, l'autre va pousser franchement jusqu'à arriver au point désiré. La stratégie est très rapidement définie, et il y a peu ou pas de dialogue, l'interaction entre les sujets est presque statique, en terme de décisions, dès lors que la trajectoire est définie à l'avance.

6.1.1.3 Nécessité d'équivoques

Il est nécessaire de provoquer un dialogue entre les utilisateurs, pour que l'interaction soit dynamique, et non pas statique. Pour provoquer ce dialogue, on peut par exemple proposer une tâche pouvant être effectuée de différentes façons, présentant des phases de décision, obligeant les utilisateurs à faire un choix parmi plusieurs options ou directions.

6.2 Tâche coopérative

L'Environnement Virtuel Coopératif (EVC) consiste en un plan virtuel sur lequel est posé un cube. Les deux utilisateurs ont chacun une vue 3D sur cet EVC et peuvent déplacer ce cube sur le plan de façon coopérative, grâce aux deux techniques que l'on désire comparer.

Les deux utilisateurs déplacent un cube bleu en collaboration, en utilisant l'une ou l'autre des techniques proposées. Le cube est contraint de rester sur le plan. La comparaison entre les deux techniques de manipulation se fait au travers d'une tâche de déplacement proposée aux deux participants. Neuf cubes rouges sont affichés sur le plan virtuel, la tâche consiste à traverser tous les cubes rouges en déplaçant le cube bleu dans le plan (Figure 6.3).

La tâche est faite de manière à ce qu'un dialogue s'instaure : les deux participants doivent traverser le cube central en premier, et traverser tous les autres cubes dans un ordre indifférent. Cette situation laisse le choix aux utilisateurs. Premièrement, vers quel cube aller en premier, dans les 8 choix possibles ? Deuxièmement dans quelle direction aller ensuite ?

6.2.1 Avec périphérique en commande relative

Le périphérique proposé est identique à celui que nous avons mis en place au Chapitre 4, Section 4.3. Chaque utilisateur dispose de ce périphérique dans sa main dominante, celui-ci leur permet de spécifier un déplacement intentionnel, en commande relative, en dirigeant le périphérique dans la direction désirée, et en appuyant plus ou moins fortement sur le capteur de pression. Le déplacement de l'objet est la résultante de ces deux intentions de déplacement. Le périphérique permet à chacune des deux personnes de spécifier une intention de déplacement, en relatif, sous forme d'un vecteur vitesse \vec{v} . Le principe est montré en Figure 6.4

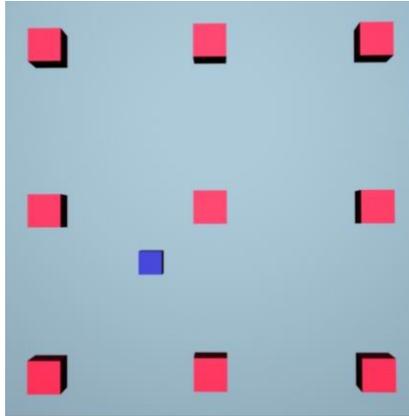


FIG. 6.3 – **Vue de dessus de la tâche proposée aux deux personnes** : 9 cubes sont répartis sur un plan, les utilisateurs contrôlent coopérativement les déplacements d'un cube, la tâche consiste à traverser les 9 cubes avec le cube manipulé, en commençant par le cube central. Quand un cube est traversé il se met à tourner sur lui même pour confirmer le passage.

6.2.2 Avec commande absolue

Pour la méthode purement visuelle, que nous appellerons commande absolue, les utilisateurs tiennent chacun un système de suivi de mouvements, et n'ont pas à appuyer sur le périphérique. Les déplacements de l'objet sont uniquement commandés par les mouvements absolus de la main de chaque utilisateur. La translation résultante de l'objet virtuel est la simple composition des translations instantanées de la main de chaque utilisateur. Dans ce cas, il n'y a pas d'interaction vue/toucher, le toucher n'étant pas mis en jeu dans le contrôle.

Pour cette situation, nous utiliserons le terme commande absolue, car c'est le mouvement absolu de chaque utilisateur qui est pris en compte. Cependant, la situation diffère quelque peu de la commande absolue pour un seul utilisateur, chaque utilisateur ne voit pas son mouvement exactement reproduit par l'objet, mais voit un mouvement résultant de son déplacement combiné à celui de l'autre utilisateur.

6.3 Architecture logicielle et matérielle

Différentes plateformes permettant de gérer les environnements virtuels coopératifs existent, citons la plateforme OpenMask de l'équipe SIAMES [27][4], ou la librairie CavernSoft [75]. Ces plateformes permettent en particulier de gérer une application distribuée sur plusieurs ordinateurs au travers d'un réseau de type ethernet, ce qui est souvent le cas pour les EVC.

Nous n'avons pas eu à utiliser une plateforme de ce type car nous avons choisi une architecture n'utilisant qu'un seul calculateur (voir Figure 6.5). Le calculateur graphique est un système Sgi Onyx2, qui renvoie un même signal vidéo à deux écrans, un pour chacun des deux

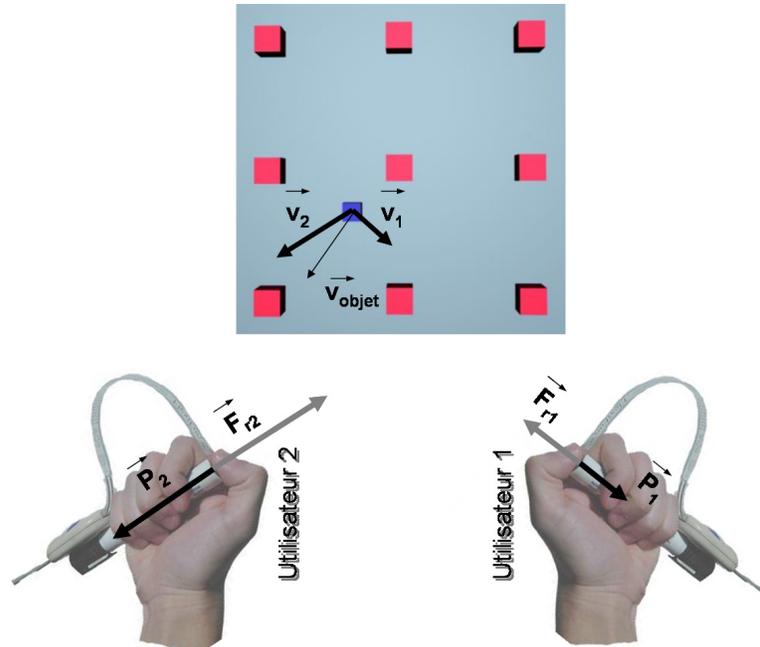


FIG. 6.4 – **Principe de coopération avec le périphérique proposé** : chacun des deux utilisateurs dispose d'un périphérique leur permettant de spécifier une vitesse de déplacement intentionnel (\vec{v}_1 et \vec{v}_2), en appliquant chacun des pressions P_1 et P_2 et en orientant le périphérique dans la direction de déplacement désirée, l'application calcule une vitesse résultant \vec{v}_{objet} , les actions des utilisateurs s'accompagnent de réactions mécaniques des périphériques \vec{F}_{r1} et \vec{F}_{r2}

utilisateurs (voir Figure 6.5). La fréquence de calcul des images est de 50Hz, imposée par l'API Performer, utilisée pour le rendu graphique.

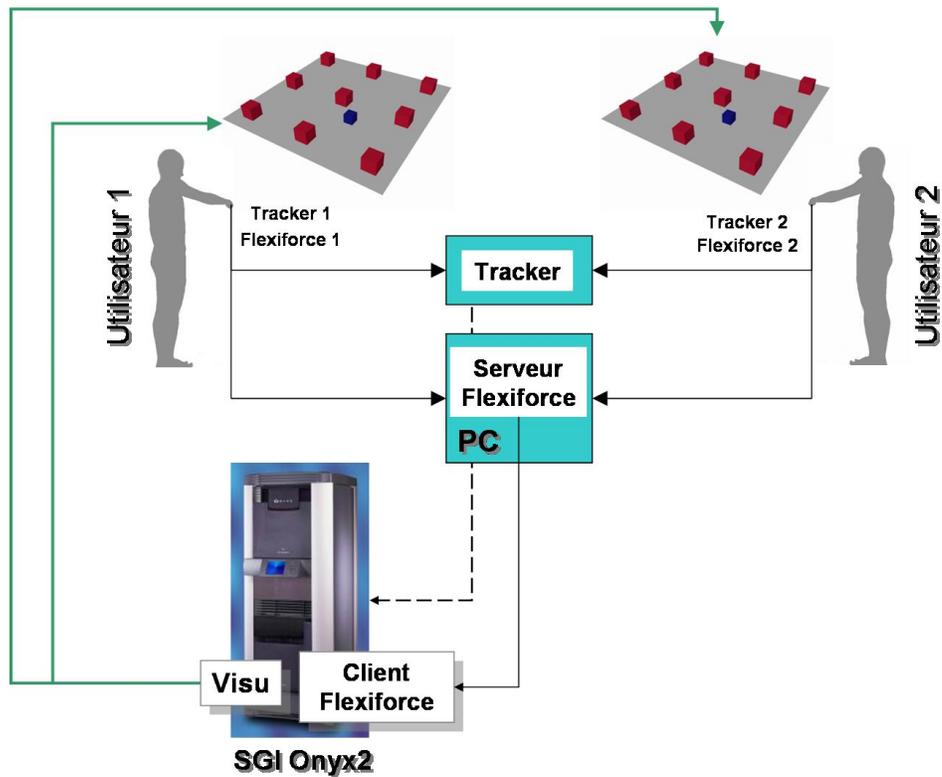


FIG. 6.5 – Architecture matérielle mise en place pour la tâche coopérative. Les deux utilisateurs maintiennent chacun un périphérique composé d'un tracker pour le suivi des mouvements et d'un capteur de forces flexiforce. Les deux capteurs Flexiforce sont reliés à un PC serveur via le port série, une application serveur s'exécute sur ce PC afin d'envoyer les données de pression de chaque utilisateur vers le calculateur graphique SGI Onyx2. Le calculateur graphique envoie le même signal vidéo à deux écrans, chacun des écrans est destiné à un utilisateur.

6.4 Première évaluation : coopération possible, mais non imposée

Nous avons effectué une première expérience, basée sur la tâche décrite en Section 6.2. La caractéristique de la coopération était que les utilisateurs avaient entièrement le choix de leur niveau de participation à l'exécution de la tâche commune, la coopération n'était pas imposée. Un cas extrême possible était que l'un des deux utilisateurs pouvait choisir de ne

pas contribuer à la tâche, c'est à dire de n'effectuer aucune action, et de laisser faire l'autre personne. Sans observer un tel cas, nous avons pu voir lors des tests que la plupart du temps, l'un des deux utilisateurs prenait rapidement le rôle de "meneur", et que l'action de l'autre utilisateur restait faible.

Nous avons voulu éviter ce type de comportement, car le but recherché est d'étudier l'éventuel apport du périphérique proposé pour une tâche réellement coopérative. Nous proposons dans la Section suivante une expérience pour laquelle la coopération est imposée.

6.5 Deuxième évaluation : coopération imposée

Dans la première évaluation, les conditions de manipulation étaient telles que la tâche pouvait être effectuée de manière non-coopérative. Il s'agit donc plutôt d'une tâche de définition de rôles dans le sens où il y a émergence d'un utilisateur principal dont l'action est dominante.

Le caractère non-coopératif de ce type de situation est à discuter, car une situation meneur/suiveur peut provenir d'une décision commune, donc d'une coopération. Mais dans le cadre de cette expérience, le caractère simultané et concomitant des actions de chacun est important. En effet, l'information haptique potentiellement véhiculée par la technique de manipulation en commande relative n'est réellement pertinente que lorsque chaque utilisateur agit et fait varier son action dans la durée, dans ce cas l'autre utilisateur a effectivement une information variable à percevoir. Si l'action d'une des deux personnes est nulle ou constante, l'autre personne ne peut pas détecter de variations, et la tâche devient mono-utilisateur.

On cherche à éviter ce phénomène car notre objectif est bien d'étudier les deux techniques lors d'une tâche coopérative en rendant la coopération entre les deux personnes nécessaire pour qu'elles arrivent à réaliser la tâche.

6.5.1 Méthode pour imposer la coopération

Comment rendre la tâche réellement coopérative, pour les deux techniques ?

Une première proposition est de distribuer les degrés de liberté de l'objet aux utilisateurs. Par exemple une personne contrôle le déplacement sur l'axe Ox , l'autre contrôle le déplacement sur l'axe Oy . Nous avons préféré mettre de côté cette solution car elle nous a semblé peu représentative d'une situation réelle.

La seconde option, celle qui a été choisie, s'inspire d'une situation réelle : celle, par exemple, d'un déménagement où l'on doit déplacer un objet particulièrement lourd. Seul, la tâche est ardue, l'aide d'une seconde personne est requise. De la même façon, nous avons imaginé que l'objet virtuel à déplacer est virtuellement trop "lourd" pour une personne, et nécessite l'action simultanée des deux.

Dans le cas de l'interaction utilisant **la commande absolue** cette idée se traduit par le choix d'une valeur faible du gain entre les déplacements de l'utilisateur et ceux de l'objet.

Ceci veut dire que lorsqu'une personne agit seule sur le cube, elle ne le déplace que très peu dans l'espace de travail. Seule l'action commune des deux utilisateurs permet d'atteindre tous les points du plan.

Dans le cas de l'interaction utilisant le **périphérique en commande relative**, l'analogie avec le monde réel est plus évidente : pour déplacer l'objet, les deux utilisateurs doivent chacun appliquer une force suffisante sur l'objet afin que la somme des deux atteigne une valeur seuil. Dans notre EVC, nous avons traduit cette contrainte par une fonction de transfert particulière entre l'action de chacun et l'amplitude de l'action résultante sur l'objet.

L'intention de mouvement de chaque utilisateur est définie grâce au périphérique, et consiste en deux paramètres : une direction de déplacement \vec{u} et un scalaire p (pression sur le capteur de force). A chaque pas de temps de la simulation, la contribution intentionnelle de chaque utilisateur se traduit par les vecteurs :

$$\begin{aligned}\vec{v}_1 &= p_1 \vec{u}_1 \\ \vec{v}_2 &= p_2 \vec{u}_2\end{aligned}$$

A chaque pas de temps Δt de la simulation, le vecteur vitesse le déplacement de l'objet est :

$$\vec{v}_{objet} = Af(p_1, p_2)(\vec{u}_1 + \vec{u}_2) \quad (6.1)$$

Le déplacement résultant est :

$$\Delta \vec{d}_{objet} = \vec{v}_{objet} \Delta t \quad (6.2)$$

A est une constante et $f(p_1, p_2)$ à définir. Cette fonction $f(p_1, p_2)$ doit répondre à deux exigences :

- retourner une action résultante nulle, ou faible si l'une des deux actions individuelles est nulle ou faible,
- ne retourner une action significative que si les deux actions individuelles dépassent chacune un même seuil donné.

La fonction $f(p_1, p_2) = e^{-(p_1^2 + p_2^2)} p_1^2 p_2^2$ tracée en Figure 6.6 satisfait à ces deux contraintes. L'action de chacun est évaluée en terme de pression (p_1 et p_2) sur le capteur de force, p_1 étant la pression appliquée sur le capteur par le sujet1 et p_2 la pression du sujet2.

6.5.2 Données recueillies

Les données suivantes ont été recueillies lors des expériences :

- Temps de parcours
- Mouvements des utilisateurs et de l'objet
- Pression appliquée sur le périphérique pour chaque utilisateur

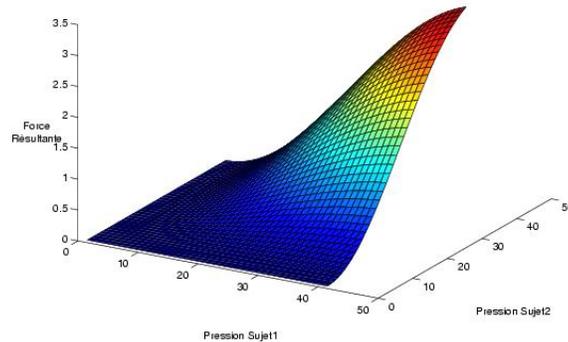


FIG. 6.6 – Le modèle de coopération prend en compte les deux actions des utilisateurs p_1, p_2 , et applique un déplacement à l'objet proportionnel à une fonction $f(p_1, p_2) = e^{-(p_1^2+p_2^2)} p_1^2 p_2^2$. Le déplacement $\Delta \vec{d}_{objet}$ est proportionnel à f , il n'est significatif que si les deux utilisateurs appuient simultanément.

6.5.3 Analyse globale de la trajectoire

En première approche, nous cherchons à avoir une compréhension globale du comportement des utilisateurs lors de la tâche coopérative. Par compréhension globale, nous entendons extraire les principales caractéristiques du mouvement résultant de l'objet : ce mouvement est-t'il saccadé, hésitant, où plutôt franc et fluide? Pour cette analyse globale, nous proposons dans un premier temps d'évaluer qualitativement ces caractéristiques en estimant visuellement l'allure générale des trajectoires, ensuite nous proposons deux indicateurs pour décrire ces caractéristiques.

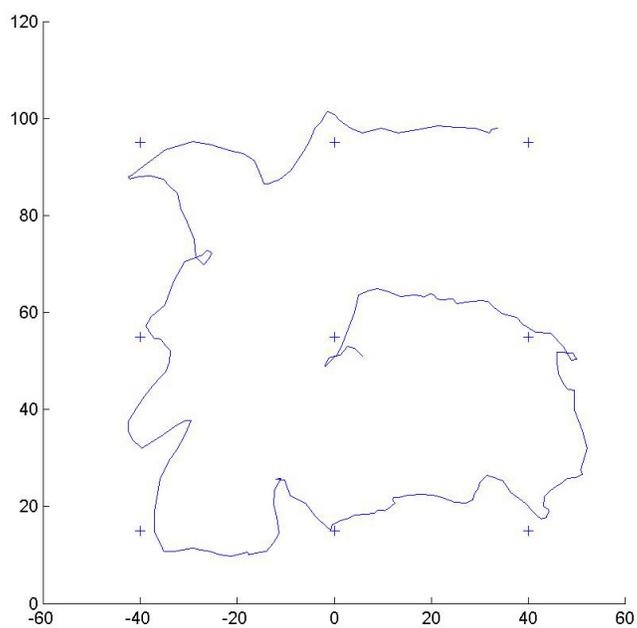
6.5.3.1 Allure générale des trajectoires

L'allure générale des courbes est présentée sur un exemple, Figure 6.7, la totalité des trajectoires figure en Annexe A.

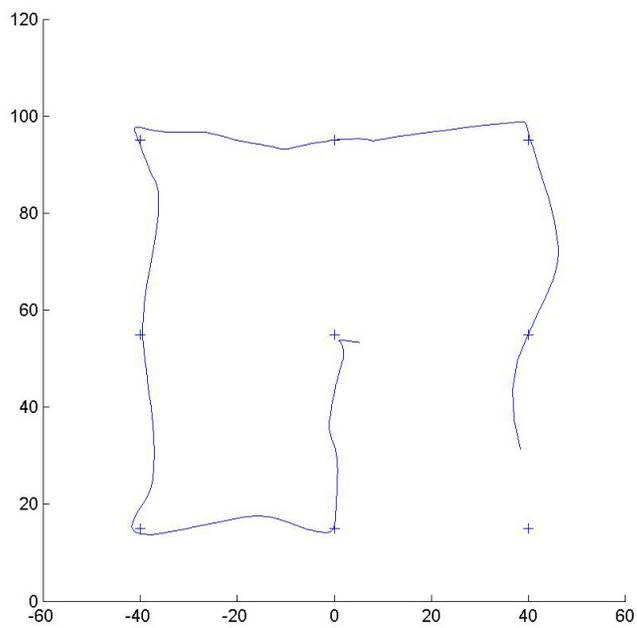
6.5.3.2 Descripteurs globaux

Nous proposons deux descripteurs dont l'objectif est de résumer l'allure générale de la courbe, nous avons choisi les descripteurs suivants :

Nombre de boucles Le nombre de boucles dans la trajectoire peut être révélatrice des hésitations et corrections. Nous comptons une boucle pour chaque intersection de la trajectoire avec elle même.



(a) Trajectoire en commande absolue



(b) Trajectoire avec le périphérique en commande relative

FIG. 6.7 – Exemples de trajectoires effectuées au cours de la tâche par un des 6 groupes

Nombre de trajectoires directes La trajectoire comprend 8 portions, correspondant aux trajets à effectuer entre les 9 cubes. Ce descripteur a pour but de caractériser la nature directe ou non du déplacement global, en comptant combien des 8 trajets ont été effectués directement. Nous considérons qu’une portion de trajectoire, entre deux cubes, a été effectuée directement si elle ne comprend pas de boucles.

Ces informations sont plutôt intuitives et difficiles à extraire numériquement. Pour les extraire des données brutes, nous avons choisi de les mesurer **manuellement**, en établissant deux descripteurs, que nous déterminons visuellement à partir des courbes de déplacement.

Pour s’assurer que les mesures ne sont pas aléatoires et bien caractéristiques des trajectoires étudiées, nous avons demandé à des personnes sans rapport avec l’étude d’effectuer la détermination de ces paramètres. Partant de la définition des descripteurs et des trajectoires, deux personnes ont traité les données manuellement. Nous avons ensuite comparé leur résultats à ceux que nous avons nous même trouvés.

Les résultats pour les boucles et les portions de trajectoires directes sont résumées dans le Tableau 6.1.

	commande absolue	avec le périphérique proposé
total des trajectoires directes	27	41
total des trajectoires avec boucles	40	5

TAB. 6.1 – Nombre total de boucles et de portions de trajectoires directes suivant le type de périphérique utilisé.

Nous avons effectué un test du χ^2 sur le nombre de boucles et le nombre de trajets directs en fonction de la variable “type de périphérique” à deux modalités : 1) commande absolue, 2) avec le périphérique proposé.

$\phi^2 = 0.24$ ce qui représente une liaison forte entre le type de périphérique et le nombre de portions directes dans la trajectoire et le nombre de boucles.

Ces deux variables sont liées de la façon suivante : en manipulation absolue, on rencontre plus de boucles et moins de portions directes, en manipulation avec le périphérique passif on retrouve plus de portions directes et moins de boucles dans la trajectoire globale.

L’effet d’ordre de passage sur le type de périphérique est à étudier, notamment pour voir la possibilité d’un apprentissage plus efficace suivant que les utilisateurs ont commencé les expériences avec le périphérique en commande relative ou la commande absolue. Nous avons étudié cet effet sur le nombre de trajets directs entre les cubes cibles (Résultats résumés dans le Tableau 6.5.3.2).

La relation entre le type de périphérique et l’ordre de passage est faible, l’ordre de passage ne

semble pas influencer l'efficacité de passage entre les cubes (en termes de nombre de boucles et de trajectoires directes).

	commande absolue	avec le périphérique proposé
ordre de passage 1-2	16	20
ordre de passage 2-1	11	21

TAB. 6.2 – Nombre total de portions de trajectoires effectuées de façon directe, suivant le l'ordre de passage du type de périphérique lors des tests, l'ordre de passage 1-2 correspond aux groupes ayant fait la tâche avec la commande absolue dans un premier temps, puis avec le périphérique en commande relative que nous étudions dans ce chapitre. L'ordre 2-1 est l'ordre inverse.

6.5.3.3 Temps et distance de parcours

La Figure 6.8 présente les temps de parcours et les distances parcourues par l'objet manipulé lors de la tâche pour chacun des six groupes.

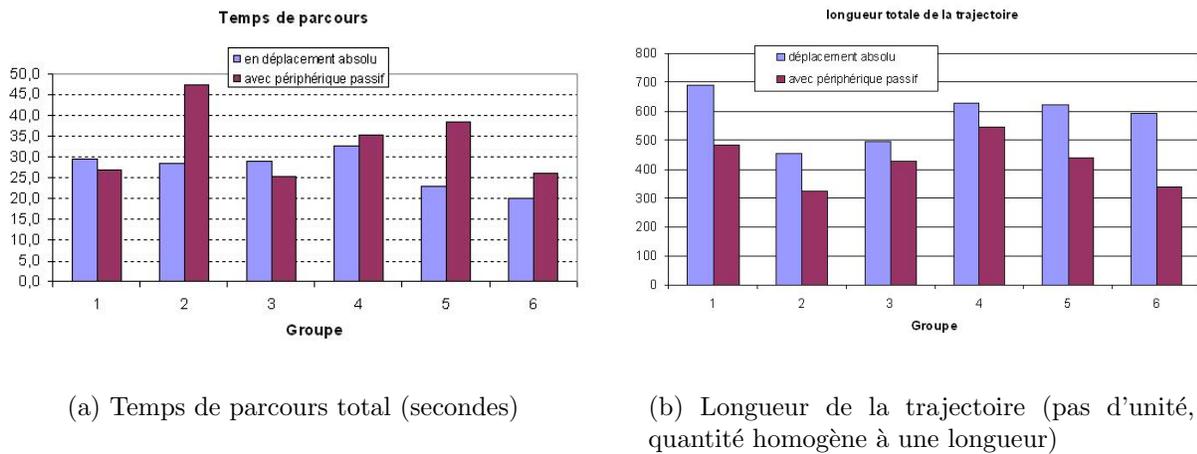


FIG. 6.8 – Temps de parcours et distance parcourue par l'objet lors de la tâche, pour chacun des six groupes.

Le temps de parcours ne semble pas suivre de tendance particulière, la distance parcourue est toujours supérieure en commande absolue qu'avec le périphérique en commande relative.

En conclusion de cette analyse globale, nous observons que trajectoire en commande absolue présente des perturbations locales et des changements brusques de direction, tandis que la trajectoire lors de la tâche effectuée avec le périphérique comporte très peu de telles “vibrations”, ni de changements brusques de direction. De plus, le nombre de boucles et de trajectoires directes dépend de la méthode utilisée : les trajectoires semblent plus fluides pour la commande relative.

6.5.4 Analyse locale de la trajectoire

6.5.4.1 Déplacements intentionnels sur les trajectoires

Nous présentons en Figure 6.9 les trajectoires présentées en exemple dans l’analyse globale, mais cette fois-ci nous avons représenté en chaque point échantillonné de la trajectoire, les déplacements intentionnels de chaque utilisateur. Le déplacement intentionnel est le vecteur vitesse exprimée au travers du périphérique multipliée par le pas de temps. Ces déplacements intentionnels figurent sous forme de flèches de couleur. Toutes les trajectoires sont présentées en Annexe A.

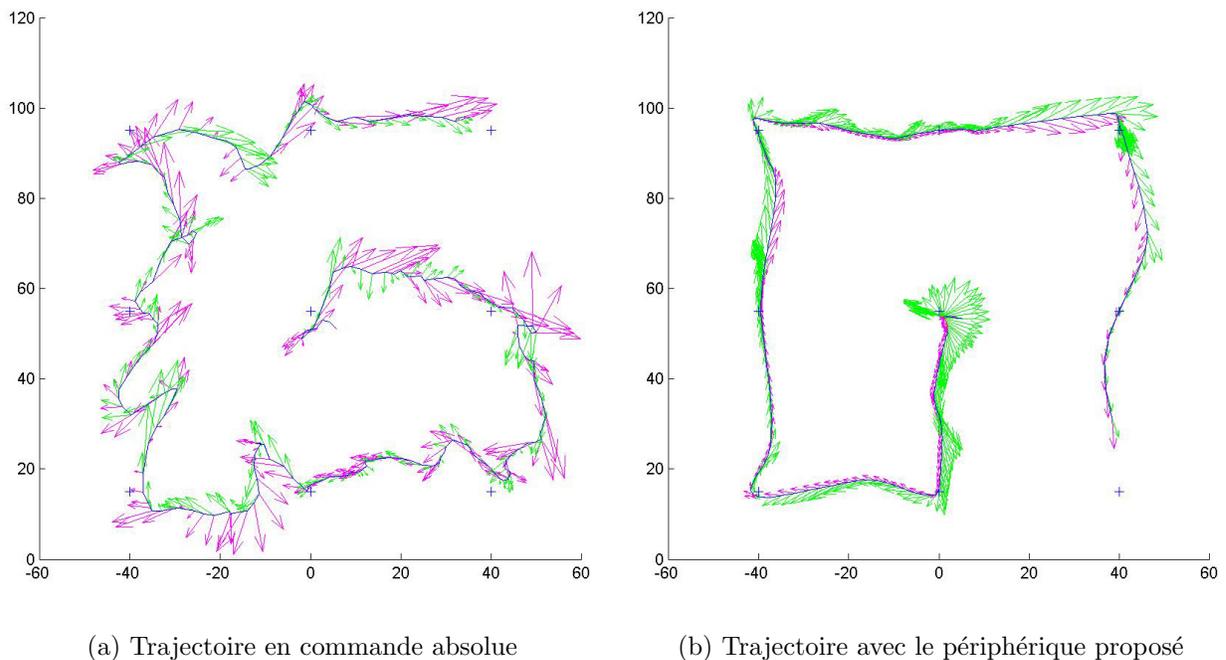


FIG. 6.9 – Exemples de trajectoires effectuées au cours de la tâche avec les déplacements intentionnels représentés sous forme de flèches en chaque point

6.5.4.2 Divergence entre les intentions deux utilisateurs

Pour évaluer la part du parcours faite en accord ou en désaccord, nous avons utilisé comme indicateur l'angle entre les vecteurs d'intention de mouvement. La Figure 6.10 illustre le sens de cet angle. Intuitivement, si les deux utilisateurs tentent d'aller dans des directions opposées, nous considérons qu'il y a désaccord entre eux. Cette situation est rencontrée lorsque $\alpha > \pi/2$.

Conventions : $\vec{d}_1(t_i) = p_1 \vec{u}_1(t_i)$, Déplacement intentionnel de l'**Utilisateur 1** au temps t_i , $\vec{d}_2(t_i) = p_2 \vec{u}_2(t_i)$, Déplacement intentionnel de l'**Utilisateur 2** au temps t_i , $\alpha(t_i)$, angle entre \vec{d}_1 et \vec{d}_2 au temps t_i .

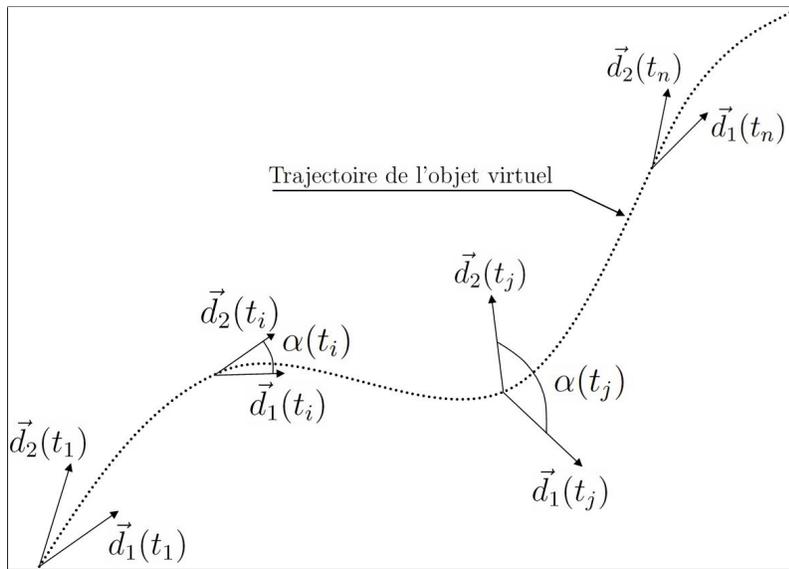


FIG. 6.10 – **Coopération : contributions, trajectoire résultante** : on représente par cette courbe un exemple de trajectoire du cube, déplacé en coopération, et les déplacements intentionnels \vec{d}_1 et \vec{d}_2 de chaque sujet aux instants t_i . L'angle α entre les deux directions de déplacement intentionnelles est pris comme indicateur : pour $\alpha > \pi/2$ nous considérons que les intentions des deux utilisateurs sont opposées.

Pour chaque tâche effectuée, nous avons calculé l'ensemble des α_i en chaque point échantillonné de la trajectoire.

Nous proposons des paramètres calculés à partir des α_i comme indicateurs pour mettre en évidence le caractère opposé de la coopération entre les deux personnes :

- $\bar{\alpha}_i$, Moyenne des α_i
- $\sigma(\alpha_i)$, Écart-type des α_i
- P_{div} , Proportion (%) de la trajectoire effectuée en situation de divergence

- N_{div} , Nombre de séquences de divergence¹
- T_{div} , Durée moyenne des situations de divergence (secondes)

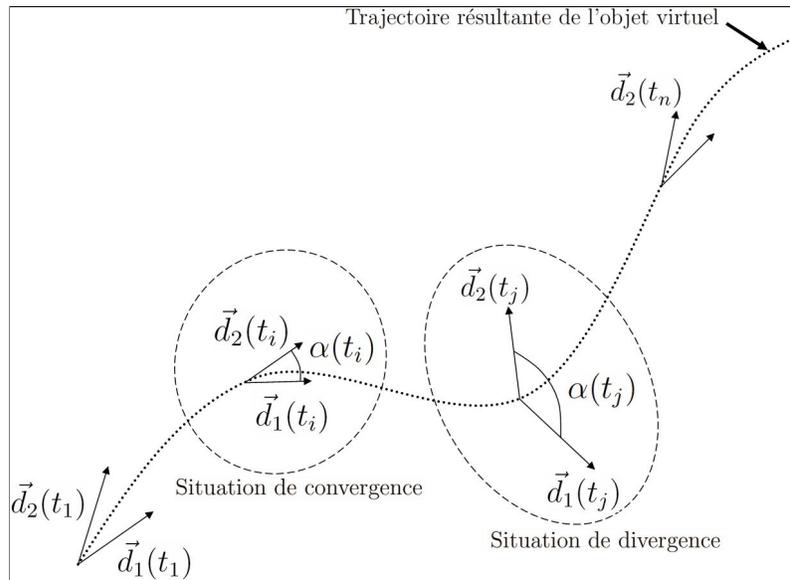


FIG. 6.11 – Situations de convergence et de divergence entre les intentions des deux utilisateurs : L'angle α entre les deux directions de déplacement intentionnelles est pris comme indicateur : pour $\alpha > \pi/2$ nous considérons que les intentions des deux utilisateurs divergent.

6.5.4.3 Convergence entre les intentions des deux utilisateurs

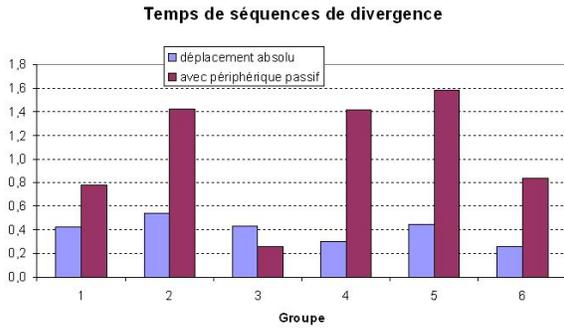
La convergence des intentions a été caractérisée comme une situation où les deux intentions de déplacement forment un angle inférieur à un seuil défini. On considère qu'il y a convergence d'intentions si $\alpha = \widehat{(\vec{d}_1, \vec{d}_2)}$ est inférieur à un angle aigu α_{conv} . Cet angle seuil, est difficile à déterminer, le concept de convergence d'intentions entre les utilisateurs étant assez subjectif et variant suivant les situations. Néanmoins nous pouvons considérer que $\alpha_{acc} = \pi/4$ caractérise une bonne partie des situations de convergence.

Les paramètres caractéristiques des situations de convergence sont :

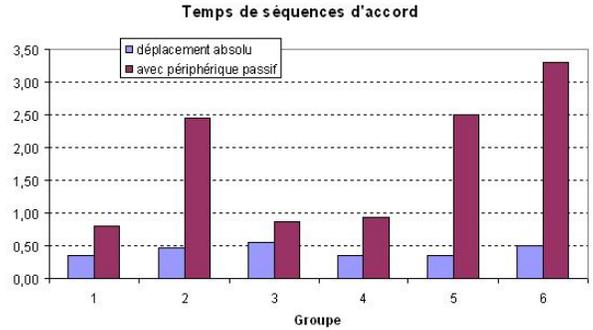
- P_{conv} , Proportion (%) de la trajectoire effectuée en situation d'accord
- N_{conv} , Nombre de séquences de convergence. Une séquence de convergence est considérée comme un ensemble de situations d'accord ($\alpha_i < \alpha_{acc}$) contiguës dans la suite temporelle des échantillons.
- T_{acc} , Durée moyenne des situations de convergence (secondes)

¹Une séquence de divergence est considérée comme un ensemble de situations de divergence ($\alpha_i > \pi/2$) contiguës dans la suite temporelle des échantillons

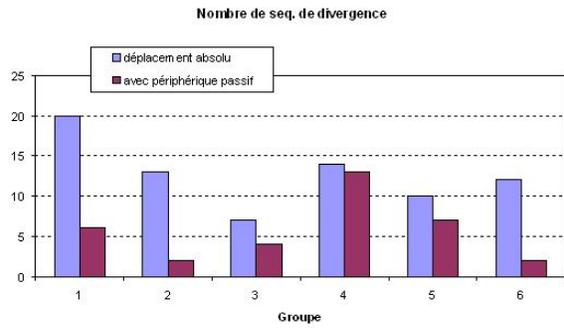
L'ensemble des résultats est résumé en Figure 6.12.



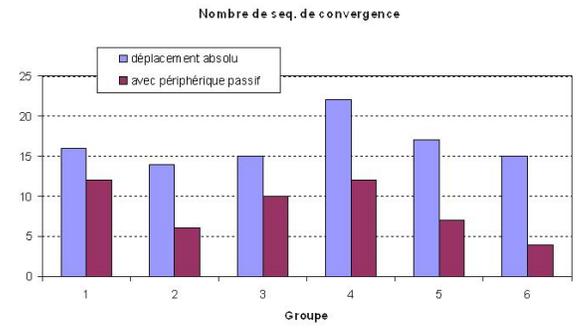
(a) Temps moyen des séquences de divergence



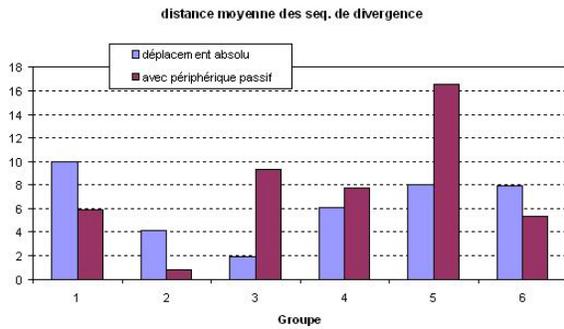
(b) Temps moyen des séquences de convergence



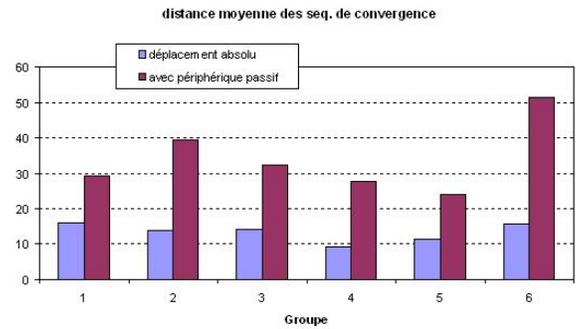
(c) Nombre de séquences de divergence



(d) Nombre de séquences de convergence



(e) Distance moyenne des séquences de divergence



(f) Distance moyenne des séquences de convergence

FIG. 6.12 – Divergence et convergence : Temps moyens, nombres de séquences, distances moyennes

Conclusion

Nous avons cherché à évaluer l'apport d'un périphérique mobile en commande relative pour l'efficacité de la coopération entre deux utilisateurs sur une tâche commune.

Dans une première vision globale, nous avons voulu décrire l'efficacité de la trajectoire de l'objet manipulé en coopération avec deux descripteurs : les boucles et les portions directes de la trajectoire. Sur la base de ces descripteurs, les trajectoires sont globalement plus efficaces avec le périphérique proposé.

Dans une approche plus locale, au vu des résultats illustrés par la Figure 6.12, pour des 6 groupes de sujets ayant participé à l'expérience, nous pouvons dégager les tendances principales suivantes :

1. Le nombre de séquences de divergence et le nombre de séquences de convergence sont toujours supérieurs en commande absolue qu'avec le périphérique proposé.
2. Le temps moyen des séquences de divergence est très inférieur en commande absolue qu'avec le périphérique proposé, sauf pour un groupe.
3. Le temps moyen des séquences de convergence est toujours supérieur avec le périphérique proposé qu'en commande absolue.
4. La distance moyenne des séquences de convergence est toujours plus grande avec le périphérique proposé qu'en commande absolue.
5. La distance moyenne des séquences de divergence ne semble pas dégager de tendance, pour trois groupes elle est supérieure avec le périphérique proposé, pour les trois autres elle est supérieure en commande absolue.

Les points 1, 2 et 3 montrent que en manipulation absolue, la situation oscille beaucoup plus fréquemment entre des séquences de convergence et de divergence, et que ces séquences sont aussi plus courtes dans le temps. La situation de convergence est donc moins stable et moins durable en commande absolue. Ce résultat est confirmé par les distances parcourues lors des séquences de convergence (point 4), qui montre la stabilité en distance de celles-ci, avec le périphérique proposé. Il se dégage donc principalement de cette vision locale de la trajectoire qu'elle se compose de séquences plus longues et moins fréquemment interrompues de convergence d'intention entre les deux utilisateurs.

Nous ne pouvons pas tirer de conclusions quant à un éventuel apport de sensations haptiques offertes par le périphérique proposé dans le cas de cette tâche coopérative.

Les résultats s'orientent plutôt vers la caractérisation du mode de manipulation en commande relative comme plus efficace pour la coopération. Les résultats montrent que la commande relative semble éviter les mouvements brusques et les forts changements de direction. Dans une situation coopérative, ces perturbations, observées lors de la commande absolue, semblent être une source de difficultés, les trajectoires observées étant saccadées et plus longues.

Notons les résultats de Zhai et Milgram [98][99], qui ont comparé un périphérique isotonique (commande absolue) et un périphérique isométrique (commande relative). Les auteurs

ont montré pour une tâche de positionnement 3D, *mono-utilisateur*, que le périphérique en commande absolue aboutissait à de meilleures performances.

Conclusion

Les recherches présentées dans ce mémoire portent sur le retour d'effort passif en environnement virtuel et l'influence de la distance de manipulation sur la manipulation dans un système immersif.

Dans le premier chapitre, une première partie s'est intéressée au retour d'effort et en particulier au retour d'effort passif. Nous avons ensuite proposé une *classification des techniques de retour d'effort passif* existantes et rappelé les deux types de forces renvoyées par les systèmes de retour d'effort, les forces *internes* et les forces *externes*.

Dans une seconde partie, nous avons présenté deux concepts : la *distance de manipulation* et la *manipulation directe*. Nous exposons une caractéristique nécessaire des systèmes immersifs pour permettre la manipulation directe : la *superposition de l'espace réel et de l'espace virtuel*. Nous rappelons que cette superposition des espaces est rendue possible par d'une part, la technique de *vision stéréoscopique*, qui permet de voir le monde virtuel en relief et avoir la sensation de profondeur, et d'autre part, *le point de vue dynamique*, qui permet à l'utilisateur d'avoir un point de vue cohérent sur le monde virtuel, quelle que soit la position de sa tête.

Le second chapitre a présenté une étude visant à étendre nos connaissances du retour d'effort pseudo-haptique proposé par Lécuyer et al.

L'étude a mis en évidence la *possibilité de renvoyer une information de type couple de forces* grâce à une technique pseudo-haptique, elle a également permis de fournir des *résultats quantitatifs de perception humaine*.

- La *résolution* de la perception de raideurs de torsion virtuelles est *meilleure avec un périphérique élastique* qu'avec un périphérique isométrique. Cependant nous avons observé une plus grande distorsion de perception en élastique qu'en isométrique.
- Les *couples appliqués* par les utilisateurs lors des tâches de comparaison ont été mesurés. Nous avons observé que le couple moyen appliqué sur le périphérique d'entrée ne dépend pas de la raideur simulée, mais est au contraire constant tout au long des tests.
- Sur la base des mesures de couples et des observations lors des tests, nous avons *écarté deux hypothèses de stratégies* de comparaison utilisées par les utilisateurs : l'une est la comparaison des couples pour des angles de déplacement égaux des ressorts réel et virtuel, l'autre est la comparaison du travail mécanique réel effectué.

Une hypothèse d'une stratégie n'a pas pu être confirmée ou infirmée. Il s'agit de la stratégie de comparaison des angles formés par le ressort réel et le ressort virtuel pour un même couple appliqué.

Nous avons formé une hypothèse supplémentaire qui propose que la discrimination se fait sur un *travail mécanique perçu*, résultant du couple appliqué sur le périphérique et du déplacement du périphérique perçu par l'utilisateur.

Nous avons ensuite abordé au troisième chapitre l'influence de la distance de manipulation sur le plan de travail virtuel. Sur ce système l'espace réel et l'espace virtuels sont superposés et la manipulation directe et à distance sont possibles.

- Les résultats montrent une *séparation de la distance de manipulation en deux domaines* : un domaine de manipulation que nous appelons domaine *proche* qui comprend les distances de 0 et 20cm, et le domaine *distant* (40 et 55cm). Les performances sont significativement meilleures pour le domaine proche que pour le domaine distant. Il y'a pas de différence significative de performance à l'intérieur de ces deux domaines.
- Les utilisateurs ont préféré en grande majorité la *manipulation directe* et l'ont classé comme le mode le plus agréable comparativement aux situations de manipulation à distance.
- Nous avons cherché à étudier l'influence de deux techniques de manipulation sur la performance lors de la manipulation à distance : l'utilisation d'un rayon et un facteur d'échelle amplifiant les mouvements de l'utilisateur. Ces deux techniques font baisser les performances.
- Nous avons proposé une hypothèse pour expliquer ces résultats basée sur la *cohérence entre les informations visuelles et proprioceptives*.

Le retour d'effort passif basé sur une interaction entre le sens de la vue et celui du toucher a été ensuite envisagé *en environnement immersif*. Deux premières approches ont été envisagées au chapitre 4 mais n'ont pas semblé offrir aux utilisateurs de sensations haptiques satisfaisantes, amenant à proposer une approche différente au chapitre 5.

Dans le chapitre 4, deux possibilités de retour en forces internes ont été explorées et testées informellement sur le plan de travail virtuel :

- Une première solution propose de permettre à l'utilisateur de déplacer des objets en *commande relative*, grâce à un périphérique doté d'une poignée tenue dans la main et d'un capteur de force sur lequel l'utilisateur appuie avec le pouce. Nous avons cherché à ce que l'utilisateur perçoive des sensations haptiques au niveau du pouce.
- Pour la seconde solution envisagée, l'utilisateur peut déplacer les objets en commande absolue, grâce à un système de suivi de mouvements, un gant de données permettant de mesurer la pression sur une balle en mousse. L'utilisateur peut appuyer sur la balle afin d'augmenter le gain de déplacement de l'objet manipulé. Nous avons cherché dans ce cas à ce que l'utilisateur perçoive des sensations haptiques au niveau de son poing.

Nous avons mené des tests informels sur le PTV, en présentant aux utilisateurs un plan virtuel dans lequel se trouve une zone de frottements, dans lequel l'objet manipulé ralentit. Le passage dans cette zone requiert une pression de l'utilisateur sur le périphérique. Lors de ces tests, les utilisateurs parlent de sensations visuelles et peu de sensations de nature haptique au niveau de leur main.

Au chapitre 5, nous avons proposé une approche toujours basée sur une interaction entre les sens de la vue et celui du toucher, mais dont l'objectif est de fournir un retour d'effort passif en forces *externes*. Nous avons cherché à mettre en place un système permettant de renvoyer des forces variables, dans un grand espace de travail, sans utiliser d'actionneurs contrôlés par ordinateur.

- Nous avons mis en place un système composé de câbles et d'un système de freinage, couplé à un retour visuel : le retour d'effort *auto-contraint*
- Pour évaluer le système, nous avons mené une expérience de comparaison de viscosités entre deux zones virtuelles. Les résultats montrent que le système a permis de comparer les viscosités simulées de zones virtuelles.
- Nous avons mesuré les forces appliquées par les utilisateurs sur le système et avons constaté que celles-ci sont en moyenne proportionnelles à la propriété physique simulée. Ce résultat montre que le périphérique a effectivement renvoyé des forces de frottement supérieures lorsque l'on a simulé des frottements virtuels plus grands.
- Le système a permis d'augmenter la résolution de perception, comparativement à une situation uniquement visuelle, pour laquelle aucune information de nature haptique n'était disponible. Cependant cette différence n'est pas très importante (JND de 25,8% en visuel pur et 22,8% avec le périphérique).
- Enfin, le système a été installé sur le plan de travail virtuel.

Au chapitre 6, nous avons cherché à évaluer l'apport de la méthode en commande relative utilisant un capteur de force proposée au chapitre 4 dans le contexte d'une coopération entre deux utilisateurs.

Nous avons proposé à deux utilisateurs une tâche de déplacement d'un objet dans un parcours reliant différentes cibles. Chaque utilisateur dispose du périphérique proposé. Nous avons conçu la tâche de façon à ce qu'elle *nécessite obligatoirement une action commune* des deux utilisateurs et qu'elle comprenne des *phases décisionnelles*.

Nous avons cherché à décrire l'efficacité de l'exécution de la tâche en analysant la *trajectoire résultante* de l'objet, et en étudiant les *contributions* de chaque utilisateur au déplacement de l'objet virtuel déplacé en coopération.

Pour cela nous avons proposé deux approches :

- *une vision globale* de la trajectoire où nous avons cherché à caractériser l'efficacité de la trajectoire en comptant le nombre de boucles et le nombre de portions du parcours effectuées directement.
- *une vision locale* dans laquelle nous avons caractérisé deux types de situations : les *situations de convergence*, cas où les déplacements intentionnels des deux utilisateurs sont proches, et les *situations de divergence*, cas où les déplacements intentionnels sont très éloignés.

Deux situations de manipulation ont été comparées, une situation en commande relative, avec le périphérique proposé, et une manipulation que nous avons appelé en commande absolue, pour laquelle les déplacements absolus de chaque utilisateur sont composés.

- L'*approche globale* a montré que la trajectoire est plus fluide avec le périphérique en commande relative.
- L'*approche locale* montre que les séquences de convergence sont plus longues avec le pé-

riphérique proposé. En commande absolue la trajectoire comprend beaucoup plus de séquences de convergences et de divergences, plus courtes dans le temps que en commande relative.

Sur la base de ces résultats, nous ne pouvons pas tirer de conclusions quant à un éventuel apport de sensations haptiques offert par le périphérique proposé dans le cas de cette tâche coopérative. Cependant, les résultats tendent à montrer que la commande relative proposée au travers de ce périphérique permet d'obtenir une trajectoire plus fluide et plus directe comparativement à la situation où la contribution de chaque utilisateur est exprimée par un déplacement absolu.

Perspectives

Les techniques de retour d'effort passif sont souvent des techniques moins coûteuses que les retours actifs, on peut chercher des applications pour lesquelles le retour passif peut être une alternative à un retour d'effort actif.

L'interaction lors de la navigation sur les sites internet pourrait bénéficier du retour d'effort passif. Le retour d'effort passif est par son faible coût une solution intéressante pour une application grand public, par exemple, une application possible serait un site commercial proposant un catalogue d'objets que l'utilisateur pourrait tester haptiquement pour guider son choix. Il peut s'agir de ressorts ou de boutons. Van Mensvoort [5][93] propose un site internet simulant des "bosses" ou des "trous" ou encore des surfaces de textures différentes grâce à un contrôle de la vitesse de déplacement du curseur dirigé par l'utilisateur.

Le retour pseudo-haptique, du fait de la possibilité de comparer des raideurs simulées et des raideurs réelles permettrait d'estimer des propriétés physiques de façon plus réaliste. On peut imaginer que l'utilisateur dispose d'un capteur de force sur la souris et se serve de celui-ci comme périphérique isométrique pour apprécier les propriétés mécaniques des différents objets.

Pour mieux comprendre les stratégies de comparaison réel/virtuel avec la technique pseudo-haptique, les travaux futurs pourraient consister à mesurer les forces appliquées sur les ressorts réels, ainsi que d'évaluer quantitativement l'illusion haptique.

Par ailleurs, les différences entre les sujets lors des expériences peuvent être étudiées, en particulier la présence de sujets "purement haptiques", ne se laissant pas influencer par le retour visuel. Il peut être intéressant d'évaluer si ces sujets purement haptiques peuvent s'adapter et se laisser influencer par le retour visuel, après un apprentissage par exemple.

Le retour d'effort *auto-contraint* que nous avons proposé peut faire l'objet d'autres évaluations. Nous pourrions mener une expérience cherchant à évaluer si il est possible de comparer des propriétés d'objets virtuels, simulées avec le retour d'effort auto-contraint, et les propriétés physiques d'objets réels. De plus, pour une telle expérience de comparaison virtuel/réel, la calibration de la viscosité virtuelle par rapport à une viscosité réelle est nécessaire. Le problème de la calibration est ainsi posé : quel propriété physique choisir, et quel modèle physique pour la simulation virtuelle utiliser pour tenter d'approcher une équivalence avec le réel ?

Dans le cadre de l'interaction coopérative entre deux utilisateurs avec le périphérique en commande relative proposé, la question du dialogue entre les utilisateurs reste ouverte : les utilisateurs sont ils plus efficaces parce que le périphérique permet intrinsèquement une commande plus facile, ou s'agit t'il d'une conscience des actions du partenaire ? Nous pouvons chercher à mettre en place une expérience destinée à confirmer ou infirmer l'existence d'un dialogue haptique lors de l'interaction proposée pour effectuer la tâche coopérative.

Dans nos travaux, nous avons pu montrer que les *retours d'effort passifs* peuvent dans certains cas améliorer la perception haptique par rapport à une situation *sans information haptique*. Une expérience comparant le retour actif, passif, et l'interaction sans information haptique, pour une même tâche, permettrait une comparaison plus large et plus rigoureuse. Dans le cas du périphérique auto-contraint que nous avons proposé, nous pourrions mener une étude sur le plan de travail virtuel comparant trois cas d'interaction :

- pas de retour d'effort,
- l'interaction avec le système de retour d'effort actif SPIDAR [54][21] installé sur le plan de travail virtuel (Tarrin et al. [91]),
- une interaction mettant en jeu le système auto-contraint proposé dans nos travaux.

Cette expérience participerait d'un questionnement plus général, celui du positionnement des techniques de retour d'effort passif par rapport au techniques de retour d'effort actif et aux situations d'interaction sans retour d'effort.

Bibliographie

- [1] <http://www.cgsd.com/topit.html>.
 - [2] <http://www.iea.cc/ergonomics/>. International Ergonomics Association.
 - [3] http://www.immersion.com/3d/products/cyber_force.php.
 - [4] <http://www.irisa.fr/siames/openmask/>.
 - [5] <http://www.koert.com/work/activecursor/>.
 - [6] <http://www.tekscan.com/flexiforce.html>.
 - [7] Gyro moment haptic interface, 2002. http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/vrlab_web/gyro/gyro_j.html, University of Tsukuba, VR Lab.
 - [8] Haption, 2002. <http://www.haption.com>.
 - [9] Mpb technologies, 2002. http://www.mpb-technologies.ca/space/freedom6_2000/f6s/freedom6s.html.
 - [10] Sensable technologies, 2002. <http://www.sensable.com>.
 - [11] Le petit larousse, 2004.
 - [12] B. Arnaldi, J.M. Burkhardt, A. Chauffaut, S. Coquillart, T. Duval, S. Donikian, P. Fuchs, J. Grosjean, F. Harrouet, E. Klinger, D. Lourdeaux, D. Mellet d'Huart, G. Moreau, A. Paljic, J. P. Papin, P. Stergiopoulos, J. Tisseau, and I. Viaud-Delmon. *Le Traité de la Réalité Virtuelle*, volume 1, chapter 13. Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2003.
 - [13] Roland Arsenault and Colin Ware. Eye-hand co-ordination with force feedback. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 408–414. ACM Press, 2000.
 - [14] C. Basdogan, C. Ho, and M. Srinivasan M.A. ans Slater. An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. In *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, volume 7, Décembre 2000.
 - [15] C. Basdogan, C.-H. Ho, and Srinivasan M. A. Virtual environments in medical training : Graphical and haptic simulation of laparoscopic common bile duct exploration. In *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, volume 6, pages 269–285, 2001.
 - [16] P. Berkelman and R. Hollis. Interacting with virtual environments using a magnetic levitation haptic interface. In *IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems Conference*, Aug 1995.
-

- [17] F. Biocca, J. Kim, and Choi Y. Visual touch in virtual environments : An exploratory study of presence, multimodal interfaces and cross-modal sensory illusions. In *Presence*, volume 10, pages 247–265. MIT, 2001.
- [18] R. Bolt. "put that here " : voice and gesture at the graphics interface. *Proceedings of Siggraph'80. ACM.*, pages 262–270., 1980.
- [19] W. J. Book, R. Charles, H. Davis, and M. Gomes. The concept and implementation of a passive trajectory enhancing robot. In *ASME Dynamic Systems and Control Division (Atlanta, GA)*, page 633–638, 1996.
- [20] James Boritz and Kellogg S. Booth. A study of interactive 3d point location in a computer simulated virtual environment. In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 181–187. ACM Press, 1997.
- [21] Laroussi Bouguila, Masahiro Ishii, and Makoto Sato. Multi-modal haptic device for large-scale virtual environments. In *Proceedings of the eighth ACM international conference on Multimedia*, pages 277–283. ACM Press, 2000.
- [22] D. Bowman, J. LaViola, I. Poupyrev, and M. Mine. Advanced topics in 3d user interface design. In *Cours de ACM SIGGRAPH*, 2001.
- [23] J. Edward Colgate, Witaya Wannasuphoprasit, and Michael A. Peshkin. Cobots : Robots for collaboration with human operators. In *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Atlanta, GA*, volume DSC-Vol. 58, pages 433–39, 1996.
- [24] Sabine Coquillart and Gerold Wesche. The virtual palette and the virtual remote control panel : A device and an interaction paradigm for projection-based virtual environment. In *IEEE Virtual Reality, Houston, USA*, mars 1999.
- [25] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, and Thomas A. DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality : the design and implementation of the cave. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 135–142. ACM Press, 1993.
- [26] L. Hodges D. Bowman. An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments. *Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 35–38, 1997.
- [27] A. Chauffaut S. Donikian T. Duval D. Margery, B. Arnaldi. Openmask : Multi-threaded or modular animation and simulation kernel or kit : a general introduction. In B. Taravel S. Richir, P. Richard, editor, *VRIC*, pages 101–110, Juin 2002.
- [28] J.P. Djajadiningrat. *Cubby : What You See is Where You Act. Interlacing the display and manipulation spaces*. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1998.
- [29] J.P. Djajadiningrat, C.J. Overbeeke, and P.J. Stappers. Cubby : A unified interaction space for precision manipulation. In *Proc. of ITEC*, 2001.
- [30] M. Wloka et E. Greenfield. The virtual tricoder : A uniform interface for virtual reality. *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Virtual and Augmented Realities*, pages 39–40, 1995.
- [31] P.M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47 :381–391, 1954.

-
- [32] James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, and John F. Hughes. *Computer Graphics : Principles and Practice*. Addison-Wesley Pub Co, 1995.
- [33] A. Forsberg, K. Herndon, and R. Zeleznik. Aperture based selection for immersive virtual environments. *Proceedings of UIST'96, ACM.*, pages 95–96.
- [34] Yukio Fukui, Kentaro Nakata, Norio Nakamura, and Juli Yamashita. Hand-held torque feedback device. In *Conference Abstracts and Applications of ACM SIGGRAPH*, page 192, 2001.
- [35] G.A. Gescheider. *Psychophysics Method, Theory, and Application*. Lawrence Elbaum Associates, New Jersey, US, 1985.
- [36] Alfred S. Gilman, Gregg Vanderheiden, and Gottfried Zimmermann. Universal design and the grid. Technical report, Trace R & D Center, College of Engineering, University of Wisconsin-Madison, <http://trace.wisc.edu/docs/ud4grid/>, 2003.
- [37] Evan D. Graham and Christine L. MacKenzie. Physical versus virtual pointing. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 292–299. ACM Press, 1996.
- [38] Sebastien Grange, Francois Conti, Patrick Helmer, Patrice Rouiller, and Charles Baur. Overview of the delta haptic device. In *Eurohaptics 2001 Conference Proceedings, Birmingham UK*, 2001.
- [39] M.S.A Graziano. Where is my arm ? the relative role of vision and proprioception in the neuronal representation of limb position. In *National Academy of Science*, volume 96, pages 10418–10421.
- [40] M. Hachet and P. Guitton. The interaction table - a new input device designed for interaction in immersive large display environments. In *Eighth Eurographics Workshop on Virtual Environments (EGVE 2002)*, pages 189–196, Mai 2002.
- [41] M. Hachet, P. Guitton, P. Reuter, and F. Tyndiuk. The cat for efficient 2d and 3d interaction as an alternative to mouse adaptations. In *Virtual Reality Software and Technology, (VRST 2003)*, pages 205–212, Octobre 2003.
- [42] Hewett, Baecker, Card, Carey, Gasen, Mantei, Perlman, Strong, and Verplank. Acm sigchi curricula for human-computer interaction. Technical report, ACM SIGCHI, 1992,1996.
- [43] K. Hinckley, R. Pausch, J.C. Goble, and N.F. Kassell. A survey of design issues in spatial input. In ACM, editor, *UIST*, pages 213–222, 1994.
- [44] C.-H. Ho, C. Basdogan, and M. A. Srinivasan. Ray-based haptic rendering : force and torque interactions between a line probe and 3d objects in virtual environments. In *International Journal of Robotics Research*, volume 19(7), pages 668–683, 2000.
- [45] Leonard Brown Narendra Ahuja Hong Hua, Chunyu Gao and Jannick P. Rolland. A testbed for precise registration, natural occlusion and interaction in an augmented environment using a head-mounted projective display (hmpd). In *IEEE VR 2002*, pages 81–89, March 22-28, 2002, Orlando, FL.
- [46] Roger J. Hubbard. Collaborative stretcher carrying : a case study. In *Proceedings of the workshop on Virtual environments 2002*, pages 7–12. Eurographics Association, 2002.
-

- [47] Poupyrev I., Billinghamurst M., Weghorst S., and Ichikawa T. Go-go interaction technique : Non linear mapping for direct manipulation in vr. *Proceedings of UIST'96 ACM.*, pages 79–80., 1996.
- [48] Brent E Insko, Michael J Meehan, Mary C Whitton, and Frederick P Brooks, Jr. Passive haptics significantly enhances virtual environments. Technical Report TR01-010, 13 2001.
- [49] I. Poupyrev, S. Wegorst, M. Billinghamurst, and T. Ichikawa. Egocentric object manipulation in virtual environments : Empirical evaluation of interaction techniques. *EUROGRAPHICS'98*, 1998.
- [50] Pierce J., Forsberg A., Conway M., Hong S. Zeleznik R., and et al. Image plane interaction techniques in 3d immersive environments. *Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics*, 1997.
- [51] L. Jandura and M. Srinivasan. Experiments on human performance in torque discrimination and control. In *Dynamic Systems and Control, ASME, DSC-vol.55-1, C. J. Radcliffe, (ed.)*, 1994.
- [52] LA Jones and IW Hunter. A perceptual analysis of stiffness. *Exp Brain Res.*, 79(1) :150–6, 1990.
- [53] Ryugo Kijima and Michitaka Hirose. A compound virtual environment using the projective head mounted display. In *International Conference on Virtual Reality Software and Technology*, pages 111–121. ACM-SIGCHI, 1995.
- [54] Seahak Kim, Masahiro Ishii, Yasuharu Koike, and Makoto Sato. Development of tension based haptic interface and possibility of its application to virtual reality. In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 199–205. ACM Press, 2000.
- [55] W. Kruger, C.-A. Bohn, B. Frohlich, H. Schuth, W. Strauss, and G. Wesche. The responsive workbench : A virtual work environment. *IEEE Computer*, 28(7) :42–48, 1995.
- [56] A. Lécuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet. Pseudo-haptic feedback : Can isometric input devices simulate force feedback? In *IEEE Int. Conf. on Virtual Reality*, pages 83–90, 2000.
- [57] Anatole Lécuyer, Jean-Marie Burkhardt, Sabine Coquillart, and Philippe Coiffet. Boundary of illusion : an experiment of sensory integration with a pseudo-haptic system. In *Proceedings of IEEE VR'2001*, 2001.
- [58] Anatole Lécuyer, Sabine Coquillart, Abderrahmane Kheddar, Paul Richard, and Philippe Coiffet. Pseudo-haptic feedback : Can isometric input devices simulate force feedback? In *Proceedings IEEE VR'2000*, pages 83–90, 2000.
- [59] Green M. Liang J. Jdcad : "a highly interactive 3d modeling system". *Computer & Graphics*, 1994.
- [60] Robert W. Lindeman, John L. Sibert, and James K. Hahn. Hand-held windows : Towards effective 2d interaction in immersive virtual environments. In *VR*, pages 205–212, 1999.

-
- [61] I. Scott MacKenzie, Tatu Kauppinen, and Miika Silfverberg. Accuracy measures for evaluating computer pointing devices. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 9–16. ACM Press, 2001.
- [62] I. Scott MacKenzie, Abigail Sellen, and William A. S. Buxton. A comparison of input devices in element pointing and dragging tasks. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 161–166. ACM Press, 1991.
- [63] K. E. MacLean, M. J. Shaver, and D. K. Pai. Handheld haptics : A usb media controller with force sensing. In *IEEE VR2002 10th Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS 2002)*, 2002.
- [64] Andrea H. Mason, Masuma A. Walji, Elaine J. Lee, and Christine L. MacKenzie. Reaching movements to augmented and graphic objects in virtual environments. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 426–433. ACM Press, 2001.
- [65] T. Massie and K. Salisbury. The phantom haptic interface : A device for probing virtual objects. In *ASME Winter Annual Meeting , DSC.*, volume 55-1, pages 295–300, 1994.
- [66] C. Mavroidis, C. Pfeiffer, J. Lennon, A. Paljic, J. Celestino, and Y. Bar-Cohen. Modeling and design of an electro-rheological fluid based haptic system for tele-operation of space robots. In *Robotics*, pages 174–180, 2000.
- [67] Michael Meehan, Brent Insko, Mary Whitton, and Jr. Frederick P. Brooks. Physiological measures of presence in stressful virtual environments. In *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 645–652. ACM Press, 2002.
- [68] Tetsuro Ogi Hiroaki Yano Naoyuki Kakehi Makoto Saito Mutsuhiro Nakashige Michitaka Hirose, Koichi Hirota. Hapticgear : The development of a wearable force display system for immersive projection displays. In *VR 2001*, pages 123–130, 2001.
- [69] F.P. Brooks Jr. et C. H. Séquin M.R. Mine. Moving objects in space : Exploiting proprioception in virtual-environment interaction. *SIGGRAPH'97*, pages 19–26, 1997.
- [70] H. Noma and T. Miyasato. Cooperative object manipulation in virtual space using virtual physics. In *Sixth Annual Symposium on Haptic Interface for Virtual Environments and Teleoperated Systems*, 1997.
- [71] A. Paljic. Simulation d'un système à fluide electrorhéologique pour un gant à retour d'effort. Master's thesis, Université Pierre et Marie Curie, juin 1999.
- [72] A. Paljic, J-M. Burkhardt, and S. Coquillart. Evaluation of pseudo-haptic feedback for simulating torque : a comparison between isometric and elastic input devices. *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Chicago, Mars 2004*.
- [73] A. Paljic and S. Coquillart. A passive stringed force feedback system for immersive environments. In *Eurohaptics 2004*, Juin 2004.
- [74] A. Paljic, S. Coquillart, and J-M. Burkhardt. A study of distance of manipulation on the responsive workbench. *IPT'2002 Symposium (Immersive Projection Technology), Orlando, US, 2002*.
-

- [75] Kyoung S. Park, Yong J. Cho, Naveen K. Krishnaprasad, Chris Scharver, Michael J. Lewis, Jason Leigh, and Andrew E. Johnson. Cavernsoft g2 : a toolkit for high performance tele-immersive collaboration. In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 8–15. ACM Press, 2000.
- [76] I. Poupyrev, S. Weghorst, M. Billinghurst, and T. Ichikawa. Egocentric object manipulation in virtual environments : Empirical evaluation of interaction techniques. In *Proc. of Eurographics*, 1998.
- [77] Fels S. Poupyrev I., Weghorst S. Non isomorphic 3d rotational interaction techniques. *Proceedings of CHI'2000*, 2000.
- [78] Jennifer Preece, Yvonne Rogers, and Helen Sharp. *Interaction design : beyond human-computer interaction*. John Wiley and Sons, 2002.
- [79] Ramesh Raskar and Kok-Lim Low. Interacting with spatially augmented reality. In *Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics, virtual reality and visualisation*, pages 101–108. ACM Press, 2001.
- [80] Louis Rosenberg and Scott Brave. Using force feedback to enhance human performance in graphical user interfaces. In *Conference companion on Human factors in computing systems*, pages 291–292. ACM Press, 1996.
- [81] Eva-Lotta Sallnäs, Kirsten Rassmus-Gröhn, and Calle Sjöström. Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 7(4) :461–476, 2000.
- [82] Tao Sang, Colin Swindells, and Alex Uden. Torquebar : An ungrounded haptic feedback device. In *Proceedings of Human Interface Technologies*, pages 17–24., 2003.
- [83] Christopher Schmandt. Spatial input/display correspondence in a stereoscopic computer graphic work station. In *Proceedings of the 10th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 253–261. ACM Press, 1983.
- [84] O. Schneider, J. Troccaz, O. Chavanon, and D.Blin. Padyc : A synergistic robot for cardiac puncturing. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA*, page 2883–2888, 2000.
- [85] M.A. Srinivasan, G.L. Beauregard, and D. Brock. The impact of visual information on the haptic perception of stiffness in virtual environments. In *5th Ann. Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, IMECE*, volume DSC-Vol :58, pages 555–559, 1996.
- [86] Paush R. Stoakley R., Conway M. Virtual reality on a wim : Interactive worlds in miniature. *Proceedings of CHI'95*, pages 265–272., 1995.
- [87] Davin Karl Swanson. *Implementation of Arbitrary Path Constraints using Dissipative Passive Haptic Displays*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, april 2003.
- [88] Zsolt Szalavári and Michael Gervautz. The personal interaction panel - a two-handed interface for augmented reality. In *Proceedings of EUROGRAPHICS'97, Budapest, Hungary*, volume 3, pages 335–346, 1997.
- [89] H. Tan, N. Durlach, Y. Shao, and M. Wei. Manual resolution of compliance when work and force cues are minimized. In *Kazerooni H., Colgate J. E., Adelstein B. D. (Eds.), ASME, DSC-49*, pages 99–104, 1993.

- [90] Yokichi Tanaka, Yuka Kohno, Masataka Sakai, Yukio Fukui, Juli Yamashita, and Norio Nakamura. Mobile torque display and haptic characteristics of human palm. In *International Conference on Artificial Reality and Telexistence ICAT2001*, 2001.
- [91] N. Tarrin, S. Coquillart, S. Hasegawa, L. Bouguila, and M. Sato. The stringed haptic workbench : a new haptic workbench solution. In *Computer Graphics Forum*, volume 22, page 583, September 2003.
- [92] J. Troccaz and Delnondedieu. Semi-active guiding systems in surgery. a two-dof prototype of the passive arm with dynamic constraints (padyc). *Mechatronics*, 6(4) :399–421, 1996.
- [93] Ir. Mfa Koert van Mensvoort. What you see is what you feel : exploiting the dominance of the visual over the haptic domain to simulate force-feedback with cursor displacements. In *Proceedings of the conference on Designing interactive systems*, pages 345–348. ACM Press, 2002.
- [94] Matthias M. Wloka and Eliot Greenfield. The virtual tricorder : a uniform interface for virtual reality. In *Proceedings of the 8th annual ACM symposium on User interface and software technology*, pages 39–40. ACM Press, 1995.
- [95] Y. Yokokohji, R. L. Hollis, and T. Kanade. What you can see is what you can feel. -development of a visual/haptic interface to virtual environment-. In *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pages 46–53, 1996.
- [96] S. Yoshida, T. Hoshino, T. Oseki, S. Miyazaki, J. Hasegawa, and T. Fukumura. An improvement method for depth perception in stereoscopic display. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.*, pages 42–48. 1998.
- [97] S. Zhai. Investigation of feel for 6DOF inputs : Isometric and elastic rate control for manipulation in 3D environments. In *Proceedings of the Human factors and Ergonomics Society 37th annual meeting*, 1993.
- [98] S. Zhai and P. Milgram. Human performance evaluation of isometric and elastic rate controllers in a 6dof tracking task. In *Proc. SPIE Telemanipulator Technology*, volume SPIE vol. 2057, 1993.
- [99] Shumin Zhai and Paul Milgram. Human performance evaluation of manipulation schemes in virtual environments. In *VR*, pages 155–161, 1993.

Table des figures

1.1	Systèmes de retour d'effort actif	25
	(a) Phantom	25
	(b) Spidar	25
	(c) CyberForce	25
1.2	Un système de retour d'effort passif : le prop	27
1.3	Utilisation du décor pour le retour passif [67]	27
	(a) L'EV, avec un précipice dans une pièce	27
	(b) L'environnement réel, avec le plancher surélevé représentant les bords du précipice	27
1.4	Control Action Table	28
1.5	Un système gouvernable : le Cobot	30
1.6	Système PTER à freins électromagnétiques.	30
1.7	Un système mixte : TOPIT	33
1.8	Système portable de retour d'effort en forces internes [63]	34
1.9	Haptic Gear, un système de retour d'effort en forces internes	35
1.10	Cycle d'interaction Homme/Application, d'après Gilman et al.	36
1.11	Point de vue dynamique : pyramide de vue	39
	(a) Position initiale de la caméra virtuelle	39
	(b) Position de la caméra après mouvement de l'utilisateur	39
	(c) Vue de la caméra, position initiale	39
	(d) Vue de la caméra, après mouvement de l'utilisateur	39
1.12	Suivi du point de vue	40
1.13	Système PIP de réalité augmentée	43
1.14	Système immersif reconfigurable	45
	(a) en Ligne	45
	(b) en "L"	45
	(c) en "U"	45
1.15	Schéma Fishtank	46
1.16	Système Reachin	47
	(a) Vue globale	47
	(b) Retour visuel, on peut apercevoir la main de l'utilisateur au travers du miroir	47
1.17	Manipulation avec rayon virtuel, implications sur les rotations	52
	(a) à distance (seule la rotation autour de l'axe du rayon est aisée)	52

(b)	en manipulation directe (rotations locales plus faciles)	52
2.1	Simulation de ressorts en compression avec le retour pseudo-haptique par Lécuyer et al. [58]	61
(a)	Périphérique d'entrée modifié	61
(b)	Retour visuel	61
2.2	Systèmes haptiques actifs permettant un retour d'effort en couples de forces	63
(a)	PHANTOM 1.5/6DOF	63
(b)	Virtuose 6D, ©Haption	63
(c)	Delta haptic device	63
(d)	Maglev, système magnétique	63
2.3	Systèmes haptiques Gyroscopiques	64
(a)	Gyro Moment Haptic Interface	64
(b)	Gyrocube [90]	64
2.4	Retour visuel du ressort de torsion virtuel	66
2.5	Mécanisme du périphérique isométrique	67
2.6	Mécanisme du périphérique élastique	68
2.7	Système intégrant le périphérique d'entrée pour le retour pseudo-haptique (bouton de gauche) et des ressorts de torsion réels (numérotés 1, 2, 3).	69
2.8	Mécanisme du ressort de torsion réel	70
2.9	Sujet en situation de test	73
2.10	Transformées normales inverses des fonctions psychométriques]	74
2.11	JND et PSE	75
2.12	Couples de forces maximaux	77
2.13	Temps de réponses en modes isométrique et élastique (avec barres d'écart type).	77
3.1	Manipulation directe sur un écran	86
3.2	Distance de manipulation sur le PTV	87
3.3	Deux situations de manipulation sur le PTV.	89
3.4	Courbe de vitesse type	91
3.5	Manipulation selon quatre distances main/curseur	94
3.6	Curseur virtuel	95
3.7	Positions des cibles	96
3.8	Position des cibles dans l'espace	97
3.9	Temps de parcours moyen en fonction de la distance de manipulation	99
3.10	Temps de parcours moyen (en fonction des cibles)	100
3.11	Trajectoires de déplacement	101
3.12	Courbes de vitesse	101
3.13	Manipulation avec le rayon virtuel	103
3.14	Temps de parcours moyen (avec/sans indice visuel, facteur d'échelle 1/1.5)	104
3.15	Temps de parcours moyen (en fonction des cibles), Session 2	104
4.1	Interaction vue/toucher pour le retour d'effort pseudo-haptique	112
4.2	Spacemouse	113
4.3	Commande relative	114

4.4	Commande absolue	114
4.5	Périphérique proposé	118
4.6	Fonctionnement du périphérique en commande relative et forces internes (1/2)	119
4.7	Fonctionnement du périphérique en commande relative et forces internes (2/2)	119
4.8	Principe du périphérique en commande absolue	123
	(a) Hors contrainte	123
	(b) Dans une zone “visqueuse”	123
5.1	Déplacement hors contrainte	131
5.2	Déplacement contraint	131
5.3	Freinage à 1D	133
5.4	Freinage à 1D	134
5.5	Surface couverte, cas des extrémités fixes	135
5.6	Solution 2D avec enrouleurs	135
5.7	Solution 3D	136
5.8	Le périphérique de retour d’effort passif.	137
	(a) Le périphérique de retour d’effort passif.	137
	(b) L’élément de freinage	137
5.9	Première version à 3 dimensions du système, installé face à un écran. Une structure métallique maintient les fils et les enrouleurs. Le périphérique se trouve au croisement des 4 fils.	137
5.10	Retour visuel présenté lors de la tâche de discrimination	138
5.11	Pourcentage des réponses ”la zone de comparaison est plus visqueuse” en fonction de la viscosité de comparaison présentée.	140
5.12	Temps moyens de réponse pour chaque paire de comparaisons	141
5.13	Forces moyennes appliquées sur le périphérique, durant la session avec pression, lors du passage sur les zones de référence et comparaison.	141
5.14	Installation du système passif <i>auto-contraint</i> sur le plan de travail virtuel	145
	(a) vue de face	145
	(b) vue de côté	145
5.15	Deux situations de manipulation avec le périphérique auto-contraint sur le PTV	146
	(a) Objet manipulé hors contrainte	146
	(b) Objet manipulé dans une zone ”visqueuse”	146
6.1	Tache coopérative de la bague le long d’un fil	153
6.2	Expérience de coopération avec un ballon	156
	(a) Forces égales	156
	(b) Forces différentes	156
6.3	Vue de haut de la tâche proposée aux deux personnes	158
6.4	Coopération avec le périphérique proposé	159
6.5	Architecture matérielle mise en place pour la tâche coopérative	160
6.6	Modèle de coopération	163
6.7	Exemples de trajectoires effectuées au cours de la tâche coopérative	164
	(a) Trajectoire en commande absolue	164
	(b) Trajectoire avec le périphérique en commande relative	164

6.8	Temps et longueur trajectoire	166
	(a) Temps de parcours total (secondes)	166
	(b) Longueur de la trajectoire (pas d'unité, quantité homogène à une longueur)	166
6.9	Exemples de trajectoires, avec déplacements intentionnels	167
	(a) Trajectoire en commande absolue	167
	(b) Trajectoire avec le périphérique proposé	167
6.10	Coopération : contributions, trajectoire résultante	168
6.11	Coopération : situations opposition/accord	169
6.12	Divergence et convergence	171
	(a) Temps moyen des séquences de divergence	171
	(b) Temps moyen des séquences de convergence	171
	(c) Nombre de séquences de divergence	171
	(d) Nombre de séquences de convergence	171
	(e) Distance moyenne des séquences de divergence	171
	(f) Distance moyenne des séquences de convergence	171
A.1	Groupe 1	195
	(a) commande absolue	195
	(b) commande avec le périphérique en relatif	195
A.2	Groupe 2	196
	(a) commande absolue	196
	(b) commande avec le périphérique en relatif	196
A.3	Groupe 3	196
	(a) commande absolue	196
	(b) commande avec le périphérique en relatif	196
A.4	Groupe 4	197
	(a) commande absolue	197
	(b) commande avec le périphérique en relatif	197
A.5	Groupe 5	197
	(a) commande absolue	197
	(b) commande avec le périphérique en relatif	197
A.6	Groupe 6	198
	(a) commande absolue	198
	(b) commande avec le périphérique en relatif	198

Liste des tableaux

2.1	Stratégies des utilisateurs	78
3.1	Distribution des cibles sur et hors axes	95
3.2	Appréciation des sujets sur Distance de manipulation	100
3.3	Appréciations des utilisateurs, Session 2	105
5.1	Score	140
6.1	Nombre de boucles et de portions directes dans la trajectoire	165
6.2	Nombre de trajectoires directes, suivant l'ordre de passage	166

Index

- bicyclette, 132
 - casques immersifs
 - HMD, 42
 - HMPD, 44
 - See-Through, 42
 - CAVE, 17, 45, 86
 - constante de torsion, 69
 - Cubby, 89
 - cyberglove, 122
 - diplopie, 38
 - Energie
 - cinétique, 128, 132
 - thermique, 132
 - Espace
 - de Visualisation, 38
 - Fish Tank, 46
 - Fishtank, 89
 - go-go technique, 90
 - JND, 32, 61, 72, 73, 76
 - manipulation
 - directe, 41
 - à distance, 41
 - Mur immersif
 - , 46
 - OpenGL Performer, 66, 160
 - PSE, 32
 - PTV, 44
 - Périphérique
 - isométrique, 59
 - élastique, 59
 - raideur, 69
 - Reachin, 46
 - registering :voir superposition, 44
 - rhéologie, 31
 - SAR, 48
 - superposition, 44
 - technique de manipulation
 - agrégation de techniques, 54
 - aperture, 51
 - flash light, 51
 - go-go, 53
 - head crusher, 52
 - HOMER, 54
 - Image Plane techniques, 51
 - main virtuelle, 50
 - rayon virtuel, 50
 - Sticky Finger, 52
 - techniques hybrides, 54
 - WIM, 53
 - world scale grab, 54
 - tracking, 37
 - WYSIWYA, 47
 - WYSIWYF, 47
-

Annexe A

Trajectoires résultantes lors de l'expérience d'interaction en coopération

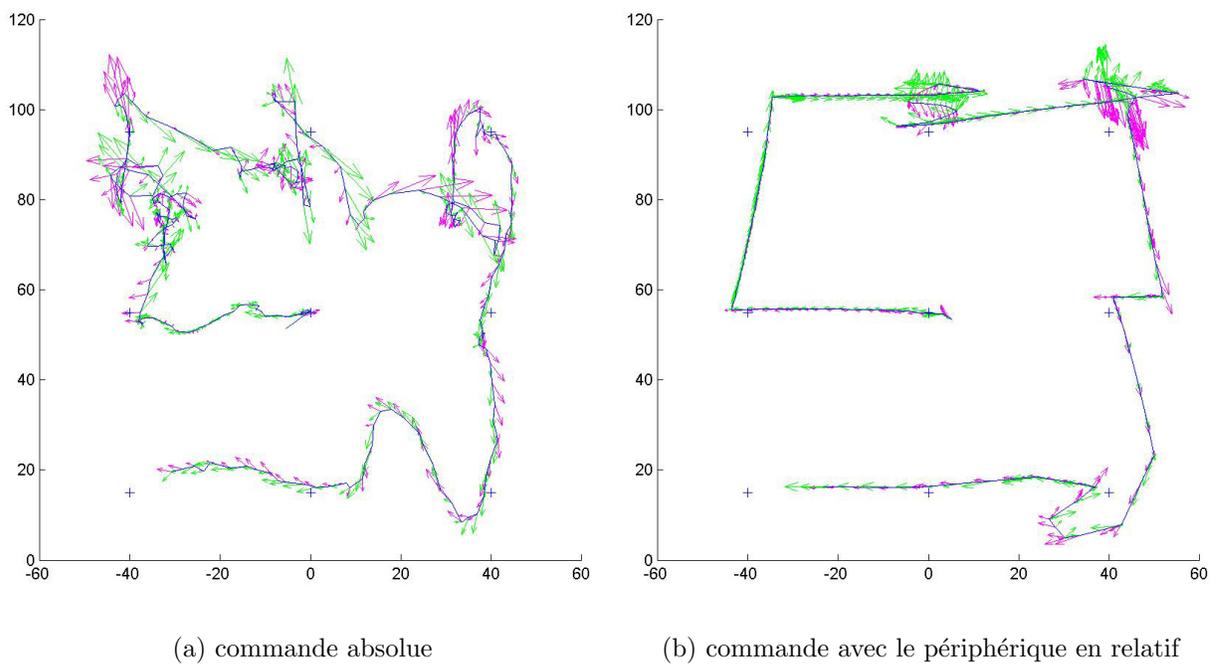


FIG. A.1 – Groupe 1

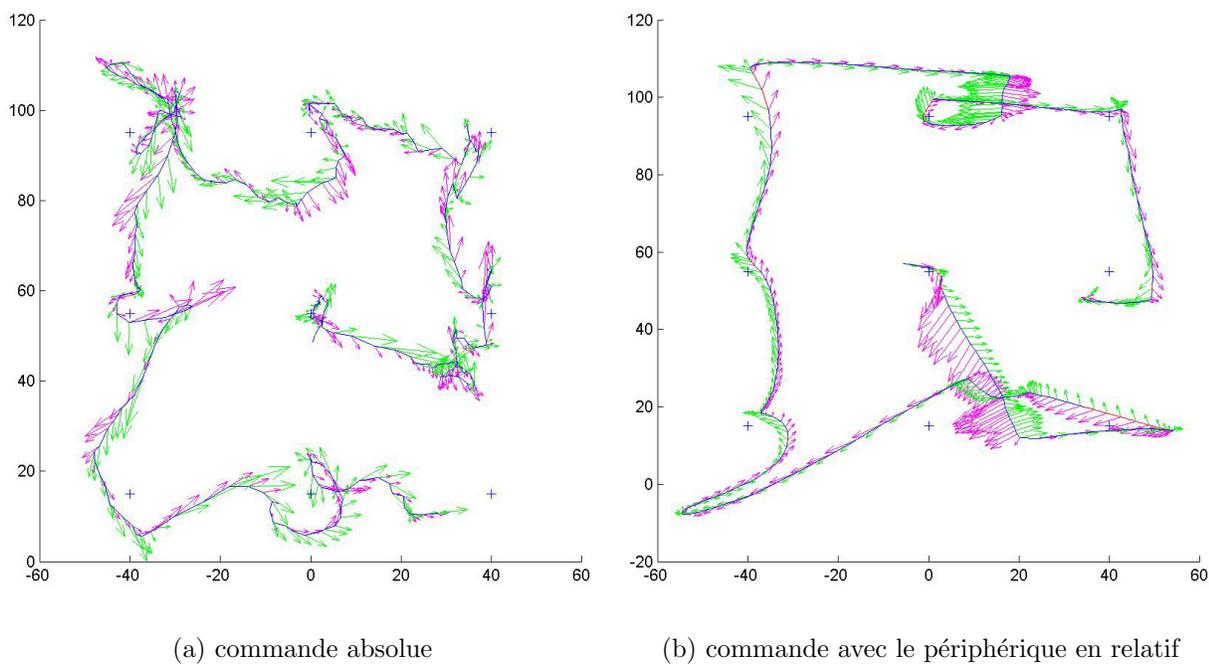


FIG. A.2 – Groupe 2

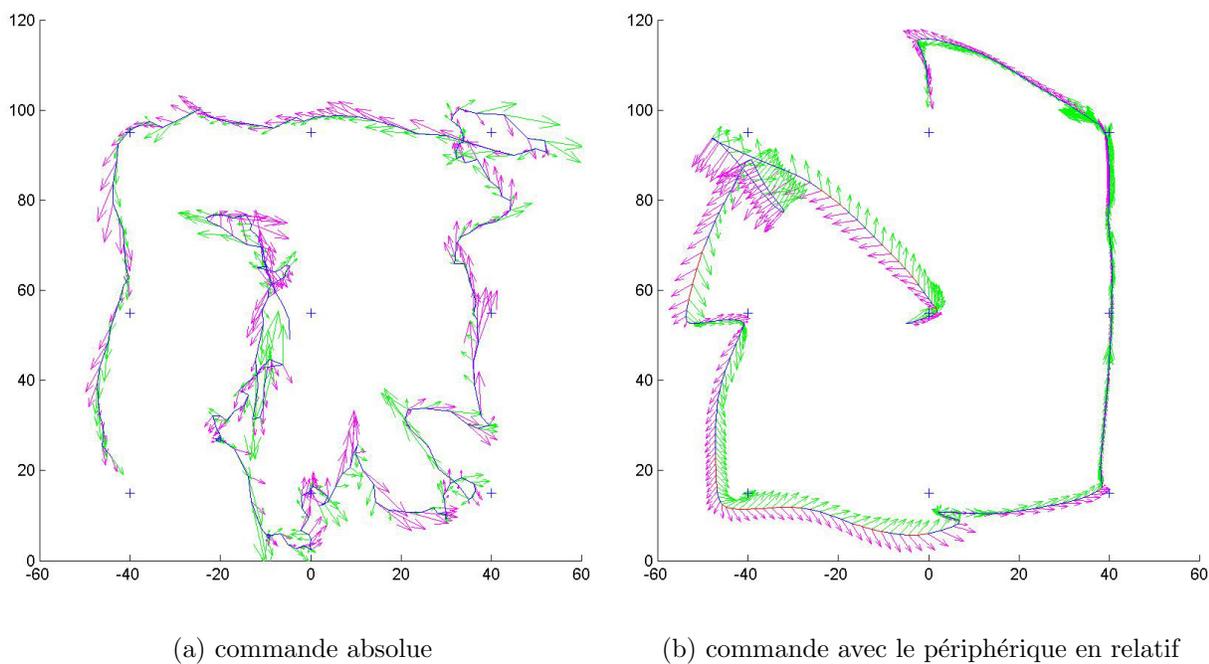
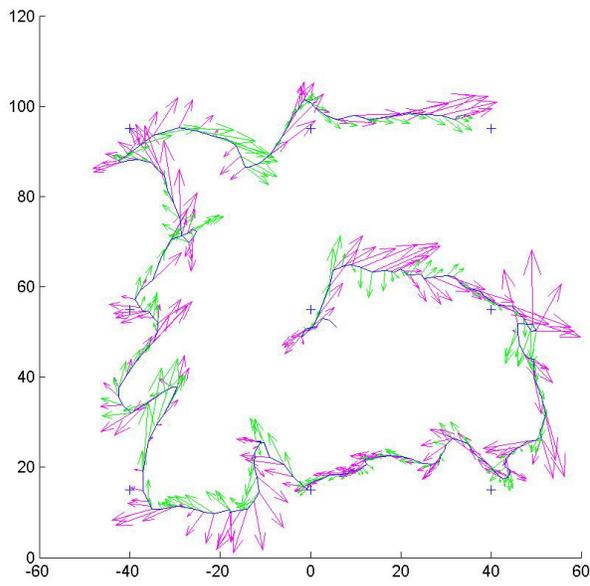
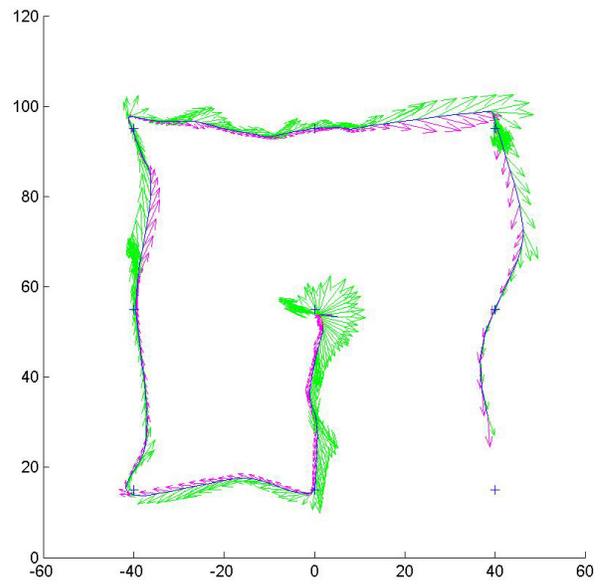


FIG. A.3 – Groupe 3

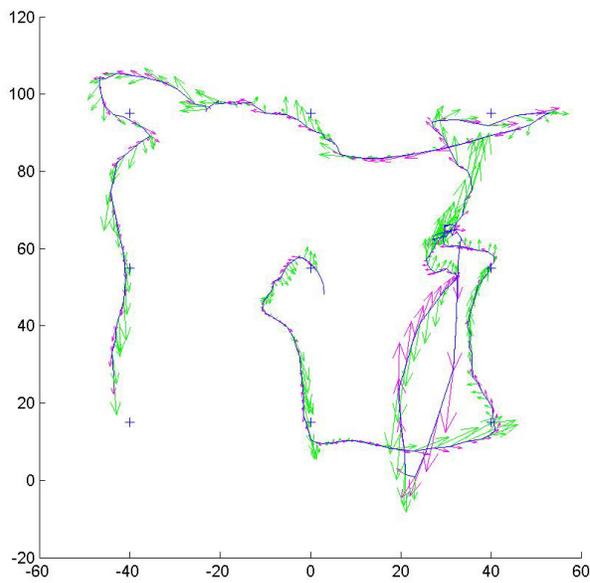


(a) commande absolue

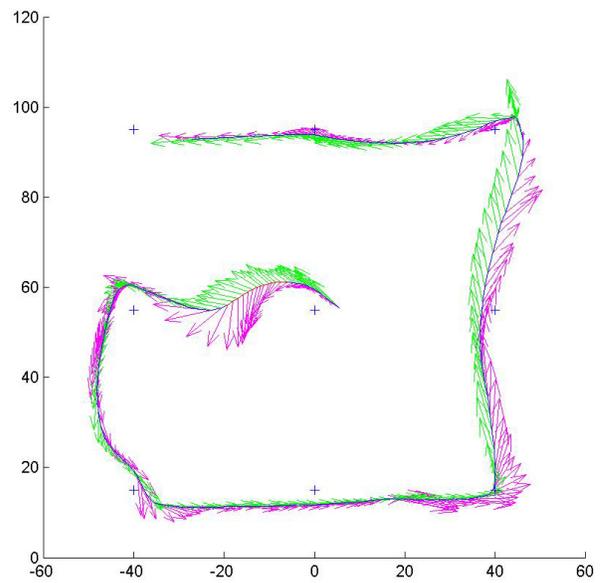


(b) commande avec le périphérique en relatif

FIG. A.4 – Groupe 4



(a) commande absolue



(b) commande avec le périphérique en relatif

FIG. A.5 – Groupe 5

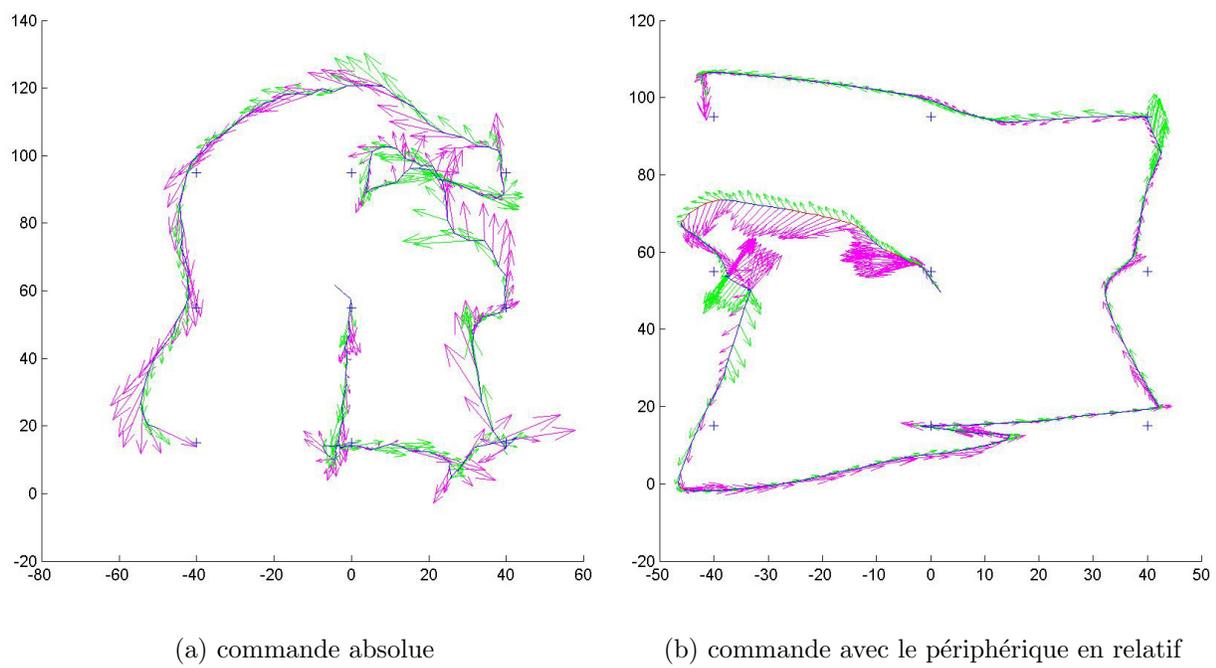


FIG. A.6 – Groupe 6

les travaux présentés dans ce mémoire ont été co-financés par l'INRIA et la région
Île-de-France.

Résumé :

Le retour d'effort permet de renvoyer à un utilisateur des informations relatives au sens du toucher. Ces travaux s'intéressent aux retours d'effort passifs, n'apportant pas d'énergie mécanique à l'utilisateur, ainsi qu'à la distance de manipulation en environnements immersifs. Nous proposons et évaluons des méthodes de retour d'effort passif dont l'objectif est de cumuler deux avantages : 1) ne pas utiliser de moteurs ou d'actionneurs, 2) pouvoir s'adapter aux changements dans l'environnement virtuel. Ces méthodes sont basées sur une interaction entre la vue et le toucher, en environnements 2D ou immersifs. Sur station, en 2D, nous montrons la possibilité de fournir un retour d'effort en couples de forces en utilisant le retour pseudo-haptique proposé par Lécuyer et al. Nous proposons ensuite un périphérique de retour haptique passif à base non fixe. Ce périphérique est évalué selon deux critères : la simulation de frottements, et son apport dans une situation de coopération entre deux utilisateurs. En environnement immersif, nous proposons un périphérique nouveau, appelé "auto-contraint", à base fixe. Le périphérique est évalué, et installé sur un Plan de Travail Virtuel. Enfin, nous étudions l'effet de la distance de manipulation sur le plan de travail virtuel, définie comme la distance séparant la main de l'utilisateur et l'objet virtuel manipulé.

Mots clefs : réalité virtuelle, retours d'effort passifs, retour pseudo-haptique, environnements immersifs, retour d'effort "auto-contraint", plan de travail virtuel, interaction entre vision et toucher, couples de forces, psychophysique, distance de manipulation, tâche coopérative.

Abstract :

Force feedback provides users with haptic information, relative to the sense of touch. This work focuses on passive force feedback -which doesn't add mechanical energy to the user- and distance of manipulation in immersive displays. We propose and evaluate passive force feedback techniques whose objective is to cumulate two advantages : 1) make no use of motors or actuators, 2) adapt to changes in the virtual environment. The proposed techniques are based on an interaction between visual and tactile senses, in 2D and immersive environments. On a 2D desktop system, we show the suitability of pseudo-haptic feedback -proposed by Lécuyer et al- for simulating torque feedback. We then propose a passive system that returns non-grounded forces. The system is evaluated in two situations : the simulation of friction and in a two-user cooperative task. In an immersive environment, we propose a new system for simulating grounded forces. It is evaluated and installed on a Workbench virtual reality system. Finally we study the effect of distance of manipulation in a responsive workbench ; we define it as the distance between the hand of the user and the virtual object being manipulated.

Keywords : virtual reality, passive force feedback, pseudo-haptic feedback, immersive environments, "self constrained" force feedback, workbench, visual/haptic interaction, torque feedback, psychophysics, distance of manipulation, cooperative interaction.