

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DE PERFORMANCE DES INTERFACES HUMAIN-MACHINE À BASE
DE MÉTAPHORES VISUELLES POUR LES SYSTÈMES DE RÉALITÉ
VIRTUELLE

MARC BERNATCHEZ
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
SEPTEMBRE 2008

© Marc Bernatchez, 2008.



Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-46092-4

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-46092-4

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

ÉTUDE DE PERFORMANCE DES INTERFACES
HUMAIN-MACHINE DE SYSTÈMES DE RÉALITÉ
VIRTUELLE À BASE DE MÉTAPHORES
VISUELLES

présentée par : BERNATCHEZ Marc

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. OZELL Benoit, Ph.D., président

M. ROBERT Jean-Marc, Doctorat, membre et directeur de recherche

M. BARON Luc, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. GUIBAULT François, ing., Ph.D., membre

M. LAURENDEAU Denis, Ph.D., membre externe

À Éricka-Maude, mars 2006 – novembre 2006

REMERCIEMENTS

L'accomplissement de cette thèse n'aurait pas été possible sans le support moral et financier de ma compagne Marie-Claude envers qui je serai éternellement reconnaissant. Je la remercie pour sa patience et sa foi en moi tout au long de ces longues années de sacrifice.

Je remercie également mes directeur et codirecteur de thèse, Jean-Marc Robert et Luc Baron pour leur soutien et savants conseils ayant contribué à l'aboutissement de ce travail de recherche.

Je remercie Miguel Chagnon du département de mathématiques et de statistique de l'Université de Montréal pour son aide lors de la validation de nos analyses statistiques.

Je tiens également à remercier les sujets ayant participé aux expériences que nous avons effectuées. Sans eux, nous n'aurions pu recueillir toutes les données de performance sur lesquelles s'appuient nos travaux.

RÉSUMÉ

La réalité virtuelle existe depuis plusieurs années déjà. Pourtant, après près de deux décennies, elle n'a pas connu la croissance que plusieurs auraient espérée. Une des justifications les plus courantes pour expliquer l'absence d'évolution et de pénétration de cette technologie dans nos vies de tous les jours demeure le coût élevé des composantes matérielles formant ces systèmes de réalité virtuelle.

Un des facteurs dominants ayant donné lieu à l'essor de l'ordinateur personnel, le « PC », au début des années 80 fut la transition d'une interface textuelle vers une interface graphique, mieux adaptée aux utilisateurs grand public et plus facile à utiliser. Partant de ce constat, la présente thèse vise à promouvoir l'émergence d'une interface graphique offrant des retombées similaires pour les systèmes de réalité virtuelle. Pour y arriver, nous avons développé une plateforme de test RV configurable et réutilisable qui forme la fondation nous permettant de réaliser des expériences avec des sujets humains, dans un environnement virtuel et avec des conditions contrôlées. Nous avons utilisé cette plateforme pour effectuer trois expériences avec des sujets humains qui ont permis de recueillir des mesures de performances ayant trait à l'utilisation d'interfaces dans un environnement virtuel.

La première expérience visait à étudier les variations de performances humaines relatives aux manipulations des panneaux de dialogue eux-mêmes. Nous avons donc eu une approche macroscopique en considérant le panneau de dialogue dans son environnement plutôt que de nous attarder au contenu du panneau de dialogue lui-même. Nous avons évalué et comparé les variations de performances suivant cinq repères définissant différents modes d'attachement entre le panneau de dialogue et le corps du sujet. L'hypothèse ici est que dans les environnements virtuels 3D, le repère utilisé pour positionner le panneau de dialogue par rapport à l'utilisateur a un impact positif sur la

performance de manipulation et la satisfaction de l'utilisateur.

Lors de l'expérience, nous avons demandé à nos sujets de manipuler un élément d'interface sur le panneau de dialogue et avons mesuré le temps et l'écart de position de ces manipulations. Même si cette mesure est considérée dans un espace local au panneau de dialogue, c'est la relation entre la position du panneau de dialogue et celle du sujet qui était le point d'intérêt de cette expérience pour évaluer les performances humaines des manipulations de l'IHM. Les résultats de cette étude montrent qu'il existe effectivement un lien entre les repères utilisés et la performance humaine de la manipulation des IHM rattachée à un repère donné. Les résultats nous ont permis de découvrir que ce lien augmente proportionnellement en fonction du nombre de degrés de liberté partagés, entre les repères des IHM et celui de l'utilisateur, et les performances humaines. La performance augmente avec le nombre de degrés de liberté partagés de sorte que les IHM qui sont attachées aux mouvements et à la position du corps de l'utilisateur sont préférables selon ces résultats.

La deuxième expérience visait à étudier les variations de performances humaines relatives aux manipulations des éléments d'interface qui composent une IHM utilisant un panneau de dialogue comme plateforme. Nous avons donc eu une approche microscopique en considérant des caractéristiques locales à ces éléments d'interface. Les trois caractéristiques étudiées sont : les changements de couleur, l'utilisation de la rétroaction visuelle « système de visée » que nous avons développée et la projection d'une ombre de la main virtuelle pour rendre l'interaction plus naturelle aux yeux de l'utilisateur. Nous avons fait varier ces trois caractéristiques au fil des manipulations effectuées par les sujets pour mesurer les variations de temps de manipulation ainsi que les écarts de positions. L'hypothèse ici est que dans le contexte de l'utilisation de panneaux de dialogue ne permettant pas de rétroaction tactile, l'utilisation du système de visée permet d'augmenter la performance de manipulation et la satisfaction de l'utilisateur comparativement aux panneaux de dialogue n'utilisant pas cette technique.

Les résultats de cette étude montrent qu'il existe un lien entre le type de rétroaction visuelle utilisé et la performance humaine à manipuler les IHM. Nous avons constaté que la rétroaction qui tente de simuler des retours d'information visuels plus naturels s'est avérée moins efficace. C'est le changement de couleur, suivi de très près par la rétroaction du système de visée, qui ont montré les meilleurs niveaux de performances. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces résultats. Un des facteurs dominants est le fort contraste de couleur qui est présent pour les deux rétroactions plus performantes. Les changements de couleur de neutre (un curseur gris dans le cas présent) à vert et à jaune utilisent des longueurs d'onde du spectre visible suffisamment distantes pour que la transition entre chacune soit facilement perceptible à l'œil de l'utilisateur et attire son attention. Le système de visée utilise une ligne de couleur rouge vif qui est également visible et démarquée des couleurs utilisées par les éléments d'interface. C'est ce manque de contraste visuel qui a nui aux performances humaines dans le cas de la rétroaction de l'ombre projetée. Plusieurs sujets ont formulé des remarques à cet égard. L'autre facteur expliquant les meilleures performances de certaines rétroactions est qu'elles fournissent une solution visuelle à un problème complexe et non explicite. Le système de visée a cette propriété en indiquant visuellement à l'utilisateur la distance qui sépare la main virtuelle de la surface du panneau de dialogue et des éléments d'interfaces. Cette rétroaction visuelle donne également l'alignement entre les éléments d'interface et la main ou le pointeur virtuel. Le système de visée réduit donc la charge cognitive de l'utilisateur en lui fournissant la solution à un problème qu'il devrait normalement résoudre mentalement, et en temps réel lors de ces manipulations.

La troisième expérience visait à étudier les variations de performances humaines dans des conditions comportant une tâche de durée plus longue et requérant un plus haut niveau de concentration du sujet. Elle visait également à tester les performances de la version 2 du système de visée et de l'ombre afin de voir si des améliorations de performances étaient observées. Nous avons apporté des améliorations à ces deux rétroactions visuelles suite à nos observations ainsi que les résultats obtenus lors de

l'expérience 2. Nous avons donc choisi de faire effectuer aux sujets un calcul arithmétique simple à l'aide d'une calculatrice virtuelle contenue sur un panneau de dialogue. La calculatrice offre une surface de travail interactive plus large avec des boutons disposés suivant une matrice de colonnes et de lignes sur la surface du menu. Cela permettait de mesurer les performances dans des conditions où les boutons sont proches les uns des autres, rendant les interactions plus difficiles à effectuer correctement. Lors de cette expérience, nous avons évalué des versions améliorées des rétroactions du système de visée et de l'ombre qui avaient été utilisées lors de l'expérience 2. La version 2 du système de visée utilise une ligne et un cercle pour indiquer la position et la distance du pointeur virtuel par rapport au panneau de dialogue. Pour l'ombre version 2, c'est un changement d'opacité de l'ombre projetée qui indique la variation de distance de la main par rapport au panneau de dialogue. Les résultats de cette étude ont permis de constater que les aides fournies par le système de visée version 2 ont un impact positif sur les performances humaines. Nous avons en effet mesuré des gains de performance pouvant atteindre 20 % avec une utilisation optimale des rétroactions visuelles de couleur et du système de visée version 2 combinée. Ainsi, sur une session d'utilisation d'un système RV d'une durée de une heure, un utilisateur verra son temps d'utilisation réduit à 48.3 minutes s'il utilise des interfaces exploitant une combinaison optimale de rétroactions visuelles par rapport à un utilisateur n'utilisant aucune rétroaction visuelle. Cela constitue un gain de 11.7 minutes, ce qui est énorme.

Les résultats de ces expériences nous ont permis de présenter une série de recommandations permettant la création d'interfaces graphiques adaptées aux exigences propres aux environnements virtuels rencontrés dans un système de réalité virtuelle (SRV). L'absence de standardisation est un autre facteur important ayant un impact négatif sur l'évolution et l'acceptation de la réalité virtuelle aux yeux du public. Les recommandations mises de l'avant dans cette thèse ont pour objectif d'être généralisables pour un ensemble de SRV plutôt que de viser une application spécifique, permettant l'établissement de standards au design d'IHM pour SRV à long terme.

Ce qui nous semble évident suite à cette recherche, c'est qu'il existe un fort potentiel d'augmentation des performances pour ce type d'interfaces qui nous encouragent à poursuivre dans cette avenue.

Ces résultats raffermissent notre conviction initiale qu'une des solutions au problème de la lenteur de l'acceptation des technologies de RV à une échelle mondiale se trouve dans le développement et l'utilisation d'IHM plus sophistiquées. Ces IHM ont le potentiel de permettre des niveaux d'interactivité encore non exploités par les SRV actuels. L'intégration d'IHM évoluées dans les SRV permettra d'utiliser la RV pour effectuer des tâches complexes dans divers domaines d'activités comme l'architecture des bâtiments, en permettant de littéralement construire ceux-ci, pièce par pièce, sans quitter l'environnement virtuel. Les IHM RV basées sur des métaphores visuelles comme les panneaux de dialogue vont ouvrir une multitude de voies en apportant aux systèmes de RV ce que la révolution WIMP a apportée aux environnements de travail sur PC. Nous espérons que nos travaux de recherche vont inspirer d'autres chercheurs à pousser les recherches dans cette direction.

ABSTRACT

Virtual reality has existed for many years already. Yet, after more than a decade, virtual reality has not grown as fast as many would have hoped. One of the causes that is often cited to explain the absence of evolution and acceptance of this technology in our every day lives is the prohibitive costs of VR hardware used to make these virtual reality systems.

One of the factors that gave rise to the personal computer, the “PC”, in the beginning of the 80’s was the transition from a textual to a graphical interface, better adapted to the general public and easier to use. Given that fact, the present thesis aims to promote the emergence of a user interface that offers similar benefits for virtual reality systems. To attain this, we have developed a configurable and reusable VR test platform which forms the foundation allowing us to conduct experiments with human subjects, within a virtual environment where various conditions can be controlled. We used this platform for three experiments with human subjects that allowed gathering performance data related to the use of user interfaces within a virtual environment.

The first experiment aimed to study human performance variations related to the manipulation of floating menus in a three-dimensional space. We thus took a macroscopic approach, considering floating menus within their environment instead of focussing our attention on the menu content itself. We evaluated the performance variations of five reference frames which define different attachment modes between the floating menu and the user body. During the experiment, we asked our subjects to manipulate an interface element on the floating menu and have measured the time and positional error of these manipulations. Even if this measure is considered within the floating menu local space, it is the relation between the position of the floating menu in space and the user’s body that was the point of interest in this experiment while

evaluating human performances. The results of this study reveal that there exists a link between the reference frames used and the user interface manipulation human performances. Our results show that there is a reciprocal link between the number of degrees of liberty shared, between the reference frames of the user interface and the user's body, and the human performances. The performance grows with the number of shared degrees of liberty such that user interfaces which are attached to the user's body movements and position are preferable based on these results.

The second experiment aimed to study human performance variations related to user interface elements manipulations composing floating menus. We thus took a microscopic approach by considering local characteristics of these interface elements. The three characteristics that were studied are: the color changes, the use of the "cubic menu", a visual retroaction that we have created and finally, the projection of a hand shadow to provide more life-like realism to the eye of the user. We made these three characteristics vary during subject's manipulations to measure the manipulation time variations as well as the positional errors. Results show that there is a link between the visual retroaction used and the human performance related to user interface manipulations. We observed that the retroactions that aim to more closely recreate natural visual retroactions have shown to be less efficient. The color changes, followed closely by the cubic menu retroaction, have shown the best performance levels. Many factors can explain these results. One of them is the strong color contrast which is present for these two retroactions. The color changes from neutral (a grey cursor in this case) to green and yellow uses wavelengths in the visual spectrum that are sufficiently spaced such that the transition between each is easily perceptible to the user's eye and attracts his attention. The cubic menu uses a bright red coloured line that is also visible and prominent from the colors used by the user interface elements. The lack of visual contrast is a key factor that negatively affected the projected shadow human performances. Many subjects have formulated remarks in that direction. The other factor explaining the better performances of some retroactions is that they provide a visual

solution to a complex and non-explicit problem. The cubic menu has this property by visually showing the user the distance between the user's hand and the floating menu surface and interface elements. The cubic menu thus reduces the user's cognitive load by providing him the solution to a problem that he would normally need to mentally resolve in real-time while manipulating.

The third experiment aimed to study human performance variations in conditions where a longer task, requiring a higher degree of concentration, is proposed. We chose to ask the subjects to perform a simple arithmetic calculation with the aid of a virtual calculator enclosed on a floating menu. The calculator offers a wider interactive working surface with buttons laid out following a matrix of rows and columns. This allowed to measure performances in conditions where buttons are close together, making interactions harder to perform correctly. During this experiment, we evaluated enhanced versions of the cubic menu and projected shadows retroactions that were used during the second experiment. The cubic menu version 2 uses a line and a circle to indicate the position and distance of the virtual pointer with regard to the floating menu. For the shadow version 2, the projected shadow opacity changes based on the distance variation of the virtual hand with regard to the floating menu. The results of this study have shown that the cubic menu version 2 has a positive impact on human performances. We effectively measured performance gains of up to 20% with the combined use of the color change and cubic menu version 2 visual retroactions. For example, considering a one hour VR system session use, a user will see his session time reduced to 48.3 minutes if he uses interfaces using an optimal combination of visual retroactions compared to a user not using any visual retroactions. This constitutes a gain of 11.7 minutes which is substantial.

The results of these experiments have allowed us to present a series of recommendations aimed at the creation of graphical interfaces that are adapted to the requirements specific to virtual environments encountered in virtual reality systems. The absence of

standardisation is another important factor which has a negative impact on the evolution and the acceptance of the virtual reality technology among the public. The recommendations brought forward in this thesis are aimed to be generic and applicable to various virtual reality systems instead of targeting a specific application, effectively allowing the establishment of long-term design standards for virtual reality system user interfaces.

This research highlights that there exist a large range of research opportunities in the direction that we took. The results observed within this thesis show that there is a great potential for performance optimisation for this type of user interfaces which encourages us to pursue in this direction.

These results strengthen our initial conviction that a solution to the slow acceptance of the virtual reality technology lies in the development and the use of more sophisticated VR user interfaces. These user interfaces have the potential to allow levels of interactivity yet unexploited by today's VR systems. The integration of advanced user interfaces within VR systems will allow using VR with complex tasks in various domains such as the architectural conception of buildings, allowing to literally conceiving the buildings, piece by piece, without leaving the virtual environment. Our work highlight the fact that VR user interfaces cannot be based solely on hand gesture or a few Wand buttons. VR user interfaces based on visual metaphors like the cubic menu will open a multitude of possibilities by giving VR systems what the WIMP revolution brought to PC computer environments. We hope that our work will inspire others researchers to push researches in that direction.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	xi
TABLE DES MATIÈRES	xv
LISTE DES TABLEAUX.....	xxi
LISTE DES FIGURES	xxv
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS.....	xxix
LISTE DES ANNEXES	xxx
CHAPITRE 1 - INTRODUCTION	1
1.1 Motivation	1
1.2 Définitions	3
1.3 Revue de littérature - Interfaces utilisateurs tridimensionnelles	7
1.3.1 Les dispositifs de pointage	7
1.3.2 Les techniques d'interaction.....	9
1.3.3 Les métaphores visuelles.....	18
1.3.4 Les autres formes d'interfaces.....	28
1.4 Problématique.....	28
1.5 Étendue de la recherche.....	31
1.6 Hypothèses	33
1.7 Contributions	34
1.8 Structure de cette thèse.....	35

CHAPITRE 2 - LES INTERFACES HUMAIN - MACHINE DANS LE DOMAINE DES ENVIRONNEMENTS VIRTUELS 36

2.1 Les systèmes de réalité virtuelle.....	36
2.2 Composantes des interfaces humain-machine pour des systèmes de réalité virtuelle.....	38

CHAPITRE 3 - CONCEPTS DE DESIGN ET D'ÉVALUATION D'Interface Humaines – Machine en Réalité Virtuelle 44

3.1 Design.....	44
3.1.1 Morphologie d'un panneau de dialogue.....	44
3.1.2 Caractéristiques des panneaux de dialogue.....	47
3.1.3 Description du panneau de dialogue utilisé dans nos expériences.....	51
3.2 Mesures de performance	52
3.2.1 Sujets	52
3.2.2 Système utilisé.....	53
3.2.3 Caractérisation de la latence du SRV	55
3.2.4 Plateforme de simulation RV configurable.....	57
3.2.5 Prototypes d'IHM incorporant des caractéristiques d'IHM.....	58
3.3 Sommaire de la méthodologie.....	58
3.3.1 Procédure expérimentale générale	58

CHAPITRE 4 - MANIPULATION DES PANNEAUX DE DIALOGUE À L'INTÉRIEUR D'UN ENVIRONNEMENT VIRTUEL 61

4.1 Introduction	61
4.1.1 Les cinq repères.....	61
4.2 Méthodologie.....	63
4.2.1 La plateforme de test.....	63
4.2.2 La tâche	66
4.2.3 Les sujets.....	68
4.2.4 Procédure.....	69

4.2.5 Variables de l'expérience	72
4.2.6 Le protocole expérimental.....	74
4.3 Résultats	75
4.3.1 Données empiriques mesurées et statistiques descriptives	75
4.3.2 Analyses de variance	84
4.3.3 Performances en fonction du repère.....	87
4.3.4 Courbe d'apprentissage	90
4.3.5 Différences attribuables au genre	92
4.3.6 Résultats qualitatifs	94
4.4 Discussion	99
4.4.1 Repère optimal	99
4.4.2 Précision versus temps de manipulation	99
4.4.3 Discussion concernant les bruits de lecture.....	101
4.4.4 Considérations relatives au positionnement des panneaux de dialogue par rapport aux sujets	108
4.4.5 Précision versus fatigue de l'utilisateur	110
4.4.6 Considérations relatives au genre des sujets	112
4.4.7 Préférences de l'utilisateur versus résultats d'analyse	112
4.5 Conclusion.....	113
CHAPITRE 5 - MANIPULATION DES ELEMENTS D'INTERFACE	
VIRTUELS D'UN PANNEAU DE DIALOGUE	114
5.1 Introduction	114
5.1.1 Les trois rétroactions visuelles étudiées	114
5.1.2 Changement de couleur.....	116
5.1.3 Système de visée	119
5.1.4 Ombres projetées.....	120
5.2 Méthodologie.....	121
5.2.1 La plateforme d'expérience.....	121

5.2.2 La tâche	122
5.2.3 Les sujets	123
5.2.4 Procédure.....	124
5.2.5 Variables de l'expérience	127
5.2.6 Le protocole expérimental.....	130
5.3 Résultats	131
5.3.1 Données empiriques mesurées et statistiques descriptives	131
5.3.2 Analyse de variance	136
5.3.3 Performances en fonction du changement de couleur des éléments d'interface	140
5.3.4 Performances en fonction de l'utilisation du système de visée.....	141
5.3.5 Performances en fonction l'utilisation de l'ombrage	143
5.3.6 Courbe d'apprentissage	144
5.3.7 Différences attribuables au genre	146
5.3.8 Résultats qualitatifs	148
5.4 Discussion	153
5.4.1 Rétroaction visuelle optimale.....	153
5.4.2 Précision versus temps de manipulation	153
5.4.3 Considérations relatives au genre des sujets	154
5.4.4 Préférences de l'utilisateur versus résultats d'analyse	155
5.5 Conclusion.....	155
CHAPITRE 6 - INTERACTIONS AVEC DES MENUS FLOTTANT DANS UN CONTEXTE D'APPLICATION RV CONCRETE	158
6.1 Introduction	158
6.2 Méthodologie.....	159
6.2.1 La plateforme d'expérience.....	159
6.2.2 La tâche	163
6.2.3 Les sujets	167

6.2.4 Procédure.....	168
6.2.5 Variables de l'expérience	170
6.2.6 Le protocole expérimental.....	171
6.3 Résultats	173
6.3.1 Données empiriques mesurées et statistiques descriptives	173
6.3.2 Analyses de variance.....	174
6.3.3 Performances en fonction du changement de couleur des éléments d'interface	176
6.3.4 Performances en fonction de l'utilisation du système de visée.....	176
6.3.5 Performances en fonction l'utilisation de l'ombrage	177
6.3.6 Courbe d'apprentissage	178
6.3.7 Différences attribuables au genre	179
6.3.8 Analyse des gains en performance	180
6.3.9 Résultats qualitatifs	184
6.4 Discussion	190
6.4.1 Rétroaction visuelle optimale.....	190
6.4.2 Considérations relatives au genre des sujets	191
6.4.3 Préférences de l'utilisateur versus résultats d'analyse	191
6.5 Conclusion.....	192

CHAPITRE 7 - CONCLUSIONS ET AVENUES DE RECHERCHE

FUTURES	196
7.1 La thèse.....	196
7.2 Les trois expériences	199
7.3 Nos hypothèses de départ et les résultats obtenus.....	200
7.4 Recommandations sur le design des panneaux de dialogue pour SRV.....	201
7.4.1 Précision de manipulation et coordination motrice.....	203
7.4.2 Design des IHM 3D.....	205
7.4.3 Rétroactions.....	206

7.4.4 Les informations spatiales.....	209
7.4.5 La charge cognitive de l'utilisateur.....	211
7.5 Limitations d'applicabilité de nos résultats.....	211
7.6 Avenues de recherche futures.....	213
7.6.1 Considérations relatives aux limitations technologiques	213
7.6.2 Pousser davantage dans la direction du système de visée (solutions visuelles)	214
7.6.3 Pousser vers des études hybrides	214
7.6.4 Comparatif entre cas non-RV et cas RV	215
7.7 Leçons apprises sur la conduite d'expériences de RV avec sujets humains	215
7.7.1 Le nombre de sujets humains requis et la force statistique	215
7.7.2 Homogénéité des sujets	217
7.7.3 La durée et la complexité de la tâche	218
7.7.4 Particularités reliées aux environnements de RV	219
7.8 Le mot de la fin	220
RÉFÉRENCES	222
ANNEXES	230

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Caractéristiques des panneaux de dialogue et contrôles virtuels	48
Tableau 3.2 : Sommaire des trois plans expérimentaux.....	60
Tableau 4.1 : Les cinq repères.....	63
Tableau 4.2 : Variables de l'expérience 1	72
Tableau 4.3 : Sommaire du plan expérimental de l'expérience 1	74
Tableau 4.4 : Ordre des cas pour l'expérience 1	75
Tableau 4.5 : Temps d'essais total moyen pour chaque repère (secondes)	76
Tableau 4.6 : Temps de sélection moyen pour chaque repère (secondes)	76
Tableau 4.7 : Temps de déplacement moyen pour chaque repère (secondes)	76
Tableau 4.8 : Erreur de positionnement moyenne pour chaque repère (centimètres)....	78
Tableau 4.9 : Temps d'essais total moyen pour chaque genre (secondes).....	79
Tableau 4.10 : Temps de sélection moyen pour chaque genre (secondes)	79
Tableau 4.11 : Temps de déplacement moyen pour chaque genre (secondes)	79
Tableau 4.12 : Erreur de positionnement moyenne pour chaque genre (centimètres).....	80
Tableau 4.13 : Temps d'essais total moyen en fonction du bruit de capteur (secondes).82	
Tableau 4.14 : Temps de sélection moyen en fonction du bruit de capteur (secondes) ..82	

Tableau 4.15 : Temps de déplacement moyen en fonction du bruit de senseur (secondes)	82
Tableau 4.16 : Erreur de positionnement moyenne en fonction du bruit de senseur (centimètres)	83
Tableau 4.17 : Analyse de variance du temps d'essai moyen (Tessai)	85
Tableau 4.18 : Analyse de variance du temps minimal de sélection (TSelect)	85
Tableau 4.19 : Analyse de variance du temps de déplacement moyen (TDepla)	86
Tableau 4.20 : Analyse de variance de l'erreur de positionnement moyenne (TDepla)	86
Tableau 4.21 : Commentaires des sujets face à l'expérience 1	94
Tableau 4.22 : Préférence des sujets relatif au repère	95
Tableau 4.23 : Occurrences des niveaux de fatigue rapportés par les sujets	97
Tableau 4.24 : Occurrences des symptômes rapportés par les sujets	97
Tableau 5.1 : États possibles pour le changement de couleur	116
Tableau 5.2 : Les 8 cas de rétroactions visuelles	126
Tableau 5.3 : Variables de l'expérience 2	127
Tableau 5.4 : Sommaire du plan expérimental de l'expérience 2	130
Tableau 5.5 : Ordre des cas pour l'expérience 2	131
Tableau 5.6 : Effet des trois rétroactions visuelles sur les temps d'essais moyens (secondes)	132

Tableau 5.7 : Effet des trois rétroactions visuelles sur les temps d'acquisition moyens (secondes).....	133
Tableau 5.8 : Effet des trois rétroactions visuelles sur les temps de sélection moyens (secondes).....	133
Tableau 5.9 : Effet des trois rétroactions visuelles sur les temps de déplacement moyens (secondes)	134
Tableau 5.10 : Effet des trois rétroactions visuelles sur l'erreur de positionnement moyenne (centimètres).....	134
Tableau 5.11 : Effet du genre sur le temps d'essais moyen (secondes).....	135
Tableau 5.12 : Effet du genre sur le temps de sélection moyen (secondes).....	135
Tableau 5.13 : Effet du genre sur le temps de déplacement moyen (secondes).....	135
Tableau 5.14 : Effet du genre sur l'erreur de positionnement moyenne (centimètres)..	136
Tableau 5.15 : Analyse de variance des temps d'essai moyens.....	137
Tableau 5.16 : Analyse de variance des temps d'acquisition moyens	138
Tableau 5.17 : Analyse de variance de l'écart de position du curseur	139
Tableau 5.18 : Compilation des commentaires faits par les sujets	149
Tableau 5.19 : Préférence des sujets relative à la rétroaction visuelle.....	150
Tableau 5.20 : Résultats qualitatifs sur le niveau de fatigue des sujets	152
Tableau 5.21 : Liste des symptômes perçus par les sujets	152
Tableau 6.1 : Liste des 10 équations de l'expérience 3.....	164

Tableau 6.2 : Variables de l'expérience 3	170
Tableau 6.3 : Sommaire du plan expérimental de l'expérience 3	172
Tableau 6.4 : Liste des cas possibles de combinaisons de rétroactions visuelles	172
Tableau 6.5 : Ordre des cas pour l'expérience 3	173
Tableau 6.6 : Effet des trois rétroactions visuelles sur le temps d'essai moyen (secondes).....	174
Tableau 6.7 : Analyse de variance des temps d'essai moyen	175
Tableau 6.8 : Gains en performance attribuables aux rétroactions visuelles	181
Tableau 6.9 : Temps d'essai en fonction des rétroactions visuelles utilisées	183
Tableau 6.10 : Commentaires faits par les sujets et des observations faites par l'auteur de la thèse lors des séances d'expérience	184
Tableau 6.11 : Préférence des sujets relative à la rétroaction visuelle.....	187
Tableau 6.12 : Résultats qualitatifs sur le niveau de fatigue des sujets	189
Tableau 6.13 : Liste des symptômes perçus par les sujets	189

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 :	Vue d'ensemble des composantes d'IHM pour SRV	37
Figure 2.2 :	Composantes des techniques d'interaction.....	38
Figure 2.3 :	Composantes des interfaces à base de métaphores visuelles	39
Figure 2.4 :	Composantes des interfaces sonores	40
Figure 2.5 :	Niveaux d'IHM en RV	41
Figure 3.1 :	Morphologie générale d'un panneau de dialogue.....	45
Figure 3.2 :	Réduction d'un menu.....	47
Figure 3.3 :	Évaluation de la latence du SRV utilisé.....	55
Figure 4.1 :	Environnement virtuel utilisé dans le cadre de nos trois expériences.....	64
Figure 4.2 :	Menu de contrôle de la plateforme de test RV.....	65
Figure 4.3 :	Tâche de l'expérience 1	67
Figure 4.4 :	Zone active du menu	73
Figure 4.5 :	Temps d'essai total moyen pour chaque repère	77
Figure 4.6 :	Erreur de positionnement moyenne pour chaque repère.....	78
Figure 4.7 :	Temps d'essai total moyen pour chaque genre	80
Figure 4.8 :	Erreur de positionnement moyenne pour chaque genre	81
Figure 4.9 :	Temps d'essai total moyen en fonction du bruit de capteur	83

Figure 4.10 : Erreur de positionnement moyenne en fonction du bruit de senseur	84
Figure 4.11 : Temps d'essai totaux moyens pour chaque repère.....	87
Figure 4.12 : Temps de sélection minimum pour chaque repère.....	89
Figure 4.13 : Erreur de positionnement pour chaque repère	90
Figure 4.14 : Courbe d'apprentissage en fonction des temps d'essai.....	91
Figure 4.15 : Courbe d'apprentissage en fonction de l'erreur de positionnement.....	92
Figure 4.16 : Temps d'essai en fonction du genre.....	93
Figure 4.17 : Erreur de positionnement en fonction du genre	93
Figure 4.18 : Préférence des sujets relative au repère	96
Figure 4.19 : Erreur statique de position du système de suivi.....	101
Figure 4.20 : Erreur statique de positionnement du système de suivi	102
Figure 4.21 : Erreur statique d'orientation du système de suivi.....	103
Figure 4.22 : Graphe 3D des erreurs statiques du système de suivi	104
Figure 4.23 : Distribution du bruit de positionnement	107
Figure 4.24 : Distribution du bruit d'orientation	107
Figure 5.1 : Rétroaction visuelle du changement de couleur.....	116
Figure 5.2 : Rétroaction visuelle du système de visée (version 1)	119
Figure 5.3 : Rétroaction visuelle de l'ombre projetée (version 1).....	121

Figure 5.4 :	Tâche de l'expérience 2	123
Figure 5.5 :	Zone de détection d'acquisition du curseur	129
Figure 5.6 :	Variation des temps d'essai en fonction du changement de couleur	140
Figure 5.7 :	Variation des erreurs de positionnement en fonction du changement de couleur.....	141
Figure 5.8 :	Variation des temps d'essai en fonction de l'utilisation du système de visée	142
Figure 5.9 :	Variation des erreurs de positionnement en fonction de l'utilisation du système de visée.....	142
Figure 5.10 :	Variation des temps d'essai en fonction de l'utilisation de l'ombrage ..	143
Figure 5.11 :	Variation des erreurs de positionnement en fonction de l'utilisation de l'ombrage	144
Figure 5.12 :	Courbe d'apprentissage en fonction des temps d'essai.....	145
Figure 5.13 :	Courbe d'apprentissage en fonction des écarts de position	146
Figure 5.14 :	Variation des temps d'essai moyens en fonction du genre	147
Figure 5.15 :	Variation des erreurs de positionnement en fonction du genre.....	148
Figure 5.16 :	Préférence des sujets relative à la rétroaction visuelle.....	151
Figure 6.1 :	Calculatrice virtuelle de l'expérience 3.....	158
Figure 6.2 :	La calculatrice virtuelle avec les rétroactions de couleur, du système de visée (version 2) et de l'ombre (version 2)	161

Figure 6.3 :	Un sujet effectuant la tâche de l'expérience 3	165
Figure 6.4 :	Les panneaux de dialogue de l'expérience 3 tels que vus par le sujet ...	166
Figure 6.5 :	Variation des temps d'essai moyens en fonction du changement de couleur.....	176
Figure 6.6 :	Variation des temps d'essai moyens en fonction de l'utilisation du système de visée (version 2)	177
Figure 6.7 :	Variation des temps d'essai moyens en fonction de l'utilisation de l'ombrage (version 2).....	178
Figure 6.8 :	Courbe d'apprentissage en fonction des temps d'essai.....	179
Figure 6.9 :	Temps d'essai en fonction du genre.....	180
Figure 6.10 :	Temps d'essai moyens en fonction de la couleur, du système de visée (version 2) et de l'ombre (version 2).....	182
Figure 6.11 :	Préférence des sujets relative à la rétroaction visuelle.....	188

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

RV	Réalité virtuelle
EV	Environnement virtuel
SRV	Système de réalité virtuelle
IHM	Interface humain-machine
WIMP	Window-Icon-Menu-Pointer
CAO	Conception assistée par ordinateur

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT ET PERMIS DU COMITÉ D'ÉTHIQUE.....	230
ANNEXE 2 : QUESTIONNAIRE UTILISATEUR STANDARD.....	233

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION

1.1 Motivation

La réalité virtuelle est une technologie qui existe depuis plusieurs années déjà. Malgré cela, les avancements majeurs durant les dernières décennies ont principalement été faits du côté du développement et du raffinement des dispositifs matériels permettant la réalisation de systèmes RV plutôt que du côté de l'amélioration des interfaces RV de tels systèmes. Des recherches ont été faites au sujet de ces interfaces RV, mais nous commençons à peine à reconnaître l'importance de cet aspect de la RV. Nous entrons dans une ère où la RV commence à apparaître comme étant plus que le fait d'utiliser un casque immersif et un gant RV, plus qu'une interface matérielle entre l'Homme et la machine. Il existe encore peu de résultats de recherches sur l'utilisation d'interfaces à l'intérieur d'un SRV. Peu des résultats de ces recherches sont généralisables de manière à permettre la réutilisation du savoir précédemment acquis permettant de faire des progrès basés sur les découvertes antérieures. La situation actuelle, en 2008, est encore souvent que les designers de SRV partent de leurs propres intuitions pour concevoir l'interface et définir son mode d'interaction avec l'utilisateur. Ceci fait en sorte que les IHM des SRV évoluent lentement et de manière incohérente.

Un des facteurs dominants ayant donné lieu à l'essor de l'ordinateur personnel, le « PC », dans les années 80 fut la transition d'une interface textuelle (à base de lignes de commandes) vers une interface graphique de type WIMP¹. L'interface graphique s'est vite révélée comme étant plus conviviale et mieux adaptée aux utilisateurs grand public. Partant de cette observation, nous avons orienté nos travaux de recherche sur l'utilisation de panneaux de dialogue et autres contrôles associés.

¹ WIMP – Windows, Icon, Menus and Pointer

Un des facteurs limitant la progression de l'utilisation des SRV est qu'il n'existe aucun standard d'interface humain-machine (IHM) pour ceux-ci après plus de 15 ans d'existence (Rorke 2000; Mine, Brooks et Sequin 1997). Chaque système utilise sa propre IHM, souvent créée à partir d'intuitions plutôt que de connaissances établies (Bowman 1999; Bowman, Kruijff, LaViola, et Poupyrev 2001).

Certains aspects des IHM de SRV, tels que les « techniques d'interaction » (Bowman 1999), ont déjà fait l'objet de recherche. Nous avons cependant identifié un aspect des IHM pour lequel il existe peu de résultats de recherche. Il s'agit des interfaces à base de métaphore visuelle, dérivé du terme anglais « system control » (Bowman, Kruijff, LaViola, et Poupyrev 2001). Les exemples les plus connus sont les panneaux de dialogue 3D et les « 3D widgets ».

Dans le cadre de cette thèse de doctorat, nous allons concentrer notre étude sur les IHM qui sont basés sur des métaphores visuelles. Ce travail de recherche constitue la suite des travaux entrepris en 1996 par l'auteur dans le cadre d'une thèse de maîtrise réalisée à l'Université Laval (Bernatchez 1996). Avec les résultats de ce travail de recherche, nous serons en mesure de produire une liste de recommandations visant à optimiser les performances d'interfaces pour SRV à base de métaphores visuelles. Ces résultats permettront éventuellement de standardiser ce type d'IHM pour SRV. Nous voulons doter les SRV d'une IHM visuellement identifiable par ses utilisateurs, à l'image de ce qui existe actuellement pour les environnements de type WIMP (Window-Icon-Menu-Pointer) tels que Microsoft Windows. Nous espérons ainsi rendre les SRV plus accessibles aux utilisateurs et unifier l'interface à laquelle ils sont confrontés lorsqu'ils utilisent de tels systèmes.

1.2 Définitions

Avant d'élaborer davantage au sujet des IHM, nous devons définir les termes qui sont utilisés dans ce texte. Certaines des définitions qui suivent font encore l'objet de débats au sein de la communauté scientifique. Dans cette perspective, nous nous efforcerons de donner les définitions les plus justes possible des termes sans toutefois prétendre que celles-ci sont définitives et indiscutables. Voici les définitions que nous utiliserons tout au long de cette thèse :

- **Casque de visualisation immersif** : casque à vision stéréoscopique, doté de deux écrans miniatures, un devant chaque œil, qui, dans un système de réalité virtuelle, permet à l'utilisateur une perception en relief des images de synthèse générées par l'ordinateur et une immersion totale dans le monde virtuel. Source : *Office québécois de la langue française, 2003.*
- **Repère** : système de coordonnées dans un espace à trois dimensions servant de point de référence pour définir la position et l'orientation d'un objet dans l'espace. Source : *Marc Bernatchez.*
- **Contrôle virtuel** : objet présent dans la scène représentant un élément d'interface humain – machine et permettant une interaction entre l'utilisateur et le SRV par manipulations directes avec la main. Source : *Marc Bernatchez.*
- **Degré de liberté** : chacun des paramètres indépendants qui permettent de définir la position et l'orientation de l'organe effecteur selon un repère orthonormé. Source : *Office de la langue française, 1998.*
- **Environnement virtuel (EV)** : environnement formé d'un ensemble cohérent d'objets modélisés en 3D avec lesquels on peut interagir en mode de réalité virtuelle. Source : (Ellis, Begault, et Wenzell 1997).

- **Gant numérique** : gant doté de capteurs sensitifs qui, dans un système de réalité virtuelle, transmettent en temps réel à l'ordinateur des informations sur les mouvements des doigts et de la main effectués par l'utilisateur et qui lui permettent d'interagir, c'est-à-dire de saisir et de manipuler des objets dans le monde virtuel. Source : *Office québécois de la langue française, 2003.*
- **Immersion / Immersif** : sensation d'être plongé dans un monde virtuel en trois dimensions, grâce à des périphériques spécialisés, marquant chez l'utilisateur le passage de la réalité à la réalité virtuelle générée par l'ordinateur. Source : *Office québécois de la langue française, 1998.*
- **Interface humain – machine (IHM)** : ensemble des outils développés et mis à la disposition de l'utilisateur pour dialoguer avec l'ordinateur. Source : *Office québécois de la langue française, 2002.*
- **Interface à base de métaphores visuelles** : sous-ensemble des IHM formé d'éléments visuels représentant une métaphore identifiable par l'utilisateur. Les panneaux de dialogue et les contrôles virtuels font partie de ce sous-ensemble d'IHM. Source : *Marc Bernatchez.*
- **Panneaux de dialogue** : ensemble de contrôles virtuels regroupés sur un panneau ou une surface plane pour former un tout logique. Les panneaux de dialogue se présentent sous la forme de menus flottant dans l'espace pouvant être positionnés à divers endroits de l'environnement virtuel par l'utilisateur. Source : *Marc Bernatchez.*
- **Métaphore visuelle** : représentation visuelle imagée par laquelle une similitude est établie entre deux phénomènes, de telle sorte que l'image représentant l'un pourra représenter l'autre. Source : *Inspirée de la définition de « métaphore » pour le domaine de l'informatique par l'Office de la langue française, 1997.*

- **Réalité virtuelle (RV)**
 - Simulation interactive et immersive d'environnements réels ou imaginaires. Source : *Jaron Lanier (traduit de la version originale anglaise)*.
 - Façon pour l'humain de visualiser, manipuler et interagir avec les ordinateurs et des données extrêmement complexes. Source : traduit de l'ouvrage anglais : "Silicon mirage – The art and science of virtual reality" (Ausstakalnis et Blatner 1992).
- **Rétroaction tactile** : principe à la base des dispositifs de réalité virtuelle, visant à provoquer chez l'utilisateur, à proximité de certains objets de l'environnement virtuel, des sensations tactiles reproduisant celles que lui donnerait le contact avec les objets réels. Source : *Dictionnaire des arts médiatiques*, © 1996, *Groupe de recherche en arts médiatiques – UQAM*.
- **Semi-immersif** : se dit d'un dispositif de visualisation permettant d'obtenir le sentiment d'immersion à un instant donné, mais ne permettant pas à l'utilisateur de rester en immersion lorsque son regard change physiquement de direction par pivotement de la tête. Les dispositifs de visualisation ne couvrant pas la totalité du champ de vision de l'utilisateur à un instant donné font généralement partie de cette catégorie. Source : *Marc Bernatchez*.

- **Système de réalité virtuelle (SRV)**
 - Interface utilisateur permettant une simulation en temps réel de la réalité, ainsi que des interactions avec le monde virtuel par de multiples canaux sensoriels (vision, audition, toucher, odorat et goût). Source : *Office québécois de la langue française, 1998.*
 - Ensemble des composants matériels et logiciels permettant la réalisation d'une simulation à base de réalité virtuelle. Source : *Marc Bernatchez.*
- **Technique d'interaction** : méthode ou convention qui définit de quelle façon un utilisateur interagit avec un SRV pour effectuer une tâche spécifique. L'action de « double-cliquer » avec un pointeur, comme la souris, sur un objet pour activer une fonction système constitue un exemple de technique d'interaction, bien connue des utilisateurs des systèmes d'exploitation usuels. Source : *Marc Bernatchez.*
- **Widgets** : objets appartenant à l'environnement virtuel, symbolisant un concept d'interaction précis, comme le déplacement ou le changement d'échelle par exemple, indiquant à l'utilisateur quelles sont les opérations d'interactions permises dans une région donnée de l'environnement virtuel. Le widget offre à l'utilisateur une interface visuelle spécifique, utilisant une métaphore symbolisant la tâche qu'il permet à l'utilisateur d'effectuer. Source : *Marc Bernatchez.*

1.3 Revue de littérature - Interfaces utilisateurs tridimensionnelles

1.3.1 Les dispositifs de pointage

Il existe actuellement plusieurs dispositifs de pointage pour SRV. Cependant, plusieurs sont trop spécifiques et d'utilisation restreinte dans un contexte plus général. Des exemples connus de dispositifs de pointage pour SRV sont les gants RV et les dispositifs plus classiques ayant été adaptés aux SRV comme le Wand par exemple. Ce dernier est composé du bâton de commande (angl. : joystick) ou de la souris classique couplé à un système de suivi de position. Les dispositifs de pointage qui attirent particulièrement l'attention sont ceux ayant été développés spécifiquement dans le but d'exploiter les aptitudes naturelles d'interaction chez l'humain.

Le gant numérique est le périphérique le plus proche de l'humain en terme de physiologie et d'ergonomie. Malheureusement, il souffre des limitations propres aux dispositifs de pointage utilisés à mains libres, dans le vide, sans contraintes physiques. Cette absence de contrainte physique fait en sorte qu'il est difficile d'effectuer des manipulations précises comme de pointer ou saisir un objet par exemple. Des recherches ont été effectuées de manière à trouver des nouveaux concepts de dispositifs de pointage n'ayant pas ces limitations.

Le concept de la tablette et du crayon « Pen & Tablet » (Angus et Sowizral 1995) révolutionne d'une certaine manière le domaine de recherche des IHM pour SRV. Ce dispositif est formé d'une tablette de forme rectangulaire à laquelle est fixé un capteur de suivi de position. Le SRV connaît donc en tout temps la position et l'orientation exactes de cette surface. L'autre composante du dispositif est un pointeur ayant la forme d'un crayon sur lequel se trouve un deuxième capteur de suivi de position. Le SRV connaît donc également l'endroit exact où se trouve le pointeur relativement à la surface. Cette combinaison surface / pointeur permet à l'utilisateur de manipuler des IHM à l'intérieur d'une simulation RV tout en ayant des rétroactions tactiles réelles. Cette

rétroaction est couplée avec la proprioception qui permet des déplacements et des pointages rapides et précis.

Plusieurs études ont permis d'établir qu'il existe une relation de coopération entre les deux mains chez l'humain. Les mains interagissent entre elles pour former un référentiel dans l'espace (Guiard 1988; Hinckley, Pausch, Proffitt, Patten et Kassell 1997). Ainsi, la main non dominante fournit un plan de référence à la main dominante. La dextérité de la main non dominante est plus faible. C'est donc la main dominante qui assume les fonctions requérant une précision accrue. Les actions effectuées par la main non dominante ont préséance sur les actions faites par la main dominante. Le plan de référence doit être établi avant que la main dominante puisse effectuer des actions précises à l'intérieur de celui-ci.

La contribution de ces recherches et du principe de tablette et crayon a été de créer un dispositif de pointage générique pour les SRV qui permet :

- une rétroaction tactile réelle à l'utilisateur,
- l'exploitation des propriétés de proprioceptions chez l'humain,
- l'exploitation des propriétés bimanuelles de l'humain.

La présence d'une tablette dans le monde réel fournit un point d'appui qui permet des mouvements beaucoup plus précis que si l'utilisateur pointait dans le vide sur un panneau de dialogue totalement virtuel. D. Bowman fait une remarque similaire dans son texte « An Introduction to 3-D User Interface Design » :

"...touching a menu item floating in space is much more difficult than selecting a menu item on the desktop, not only because the task has become 3-D, but also because the important constraint of the physical desk on which the mouse rests is missing." (Bowman, Kruijff, LaViola, et Poupyrev 2001)

Il existe des variantes du dispositif de la tablette et du crayon car sa forme physique n'a pas été standardisée à ce jour. Une variante intéressante est celle utilisant une tablette transparente (Schmalstieg, Encarnacao, et Szalavari 99; Coquillart et Wesche 99). Cela permet son utilisation aussi bien avec un SRV utilisant un HMD qu'un SRV utilisant une voûte d'immersion ou autre dispositif d'affichage par projection sur écran. En étant transparente, la surface de la tablette permet à l'image provenant d'un écran derrière elle d'être vue par l'utilisateur. Lorsque la stéréoscopie est utilisée, l'utilisateur perçoit des objets virtuels reposant sur un plan virtuel qui correspond parfaitement avec le plan physique de la tablette. Comme l'utilisateur positionne constamment la surface donnant un retour de force tactile dans l'espace, cela permet de recréer un environnement similaire au bureau et à la souris bien connus des environnements 2D. L'utilisateur dispose donc d'un point d'appui physique qui a pour effet de stabiliser ses mouvements avec le pointeur (crayon).

Kim et al. (Kim, Han, Huichul Yang, et Changseok Cho 2004) ont fait une recherche concernant l'utilisation de portions du corps de l'utilisateur comme un composant de l'interface humain – machine. Ils présentent quatre types d'interaction avec le corps : 1) « body-inspired metaphor (BIM) » 2) « Body-as-interaction-surface (BAIS) » 3) Mixed mode (MM) et 4) « Object mapping (OM) ». Le type le plus intéressant à notre point de vue est le BAIS qui permettrait par exemple de fixer une interface de type « Pen & Tablet » sur l'avant-bras gauche. Dans le cadre de notre recherche, nous avons utilisé une approche similaire avec l'utilisation de la main gauche non dominante comme surface, qui s'apparente au type OM plus haut. En effet, dans ce cas, nous représentons l'équivalent de la surface d'un menu par la main de l'utilisateur.

1.3.2 Les techniques d'interaction

Les techniques d'interaction sont apparues comme une extension logique à l'utilisation de périphériques de pointage tels que le gant numérique. Leur nécessité est apparue de l'observation des limites inhérentes reliées aux styles d'interaction dits naturels. Les

techniques d'interaction définissent de quelle manière ces périphériques sont manipulés pour accomplir une tâche particulière à l'intérieur d'un SRV.

En 1995, D. Bowman introduit la nécessité d'utiliser les contraintes dans le but de créer des techniques d'interaction plus efficaces (Bowman et Hodges 1995). De ce fait, il établit que les règles de base de conception d'IHM pour les environnements à deux dimensions s'appliquent également aux environnements à trois dimensions. Cette observation ouvre plusieurs portes car elle permet la réutilisation de résultats de recherches passés dans le domaine du 2D pour les appliquer à celui du 3D.

Rudy Darken propose une approche unifiée et modulaire permettant la création d'IHM incorporant des techniques d'interactions (Darken, Tonnesen et Passarella-Jones 1995). Ce concept de subdivision des tâches est intéressant du point de vue de nos travaux car il s'appuie sur le principe de hiérarchisation. Ce même principe est présent ailleurs en RV. Le rendu graphique de la scène d'un SRV utilise un graphe de scène utilisant une approche hiérarchique.

Un autre concept important pour les techniques d'interaction est l'utilisation combinée des deux mains (angl. : *two-handed interaction technique metaphors*) pour effectuer les tâches d'interaction. En 1995, Chris Shaw et Mark Green introduisent ce concept par l'utilisation d'une interface prenant la forme d'un disque subdivisé en plusieurs sections en pointe. Chaque section correspond à un élément que l'utilisateur peut sélectionner afin d'activer une fonction système. En 1996, Mark Mine utilise également le principe d'interaction employant les deux mains dans la manipulation de menus virtuels (Mine 1996). Le menu est attaché à la main non dominante de l'utilisateur alors que la main dominante manipule les contrôles se trouvant sur celui-ci. Comme le fait remarquer Mine, même en ayant recours à des techniques utilisant deux mains, les panneaux de dialogue flottant dans l'espace restent difficiles à manipuler pour les opérations requérant un pointage précis d'un contrôle.

“Widget selection techniques in menu systems that require the user to co-locate a hot point (such as the tip of his finger) with a widget in three-dimensional space are difficult to use and suffer from the lack of haptic feedback we depend upon when pushing a button in the real world. Preliminary experience also indicates that users find it easier to interact with panels attached to their hand than they did with panels floating freely in virtual space.” (Mine 1996)

Dans le domaine des techniques d'interaction, il existe deux principales écoles de pensée : l'approche naturaliste et l'approche non naturaliste (Rorke 2000). L'approche naturaliste consiste à concevoir des techniques d'interaction recréant le plus fidèlement possible ce que l'utilisateur s'attend de retrouver comme interaction, se basant sur son expérience des interactions du monde réel. Par opposition, les adeptes de l'approche non naturaliste préfèrent volontairement omettre de respecter certaines lois naturelles afin de permettre des interactions plus efficaces et comportant moins de restrictions.

La technique d'interaction naturaliste la plus répandue est celle de la main virtuelle classique. Cette technique consiste à effectuer une correspondance un pour un entre la position réelle de la main de l'utilisateur et la représentation virtuelle de celle-ci. La principale limitation de cette technique vient du fait que le volume d'interaction est limité par la longueur du bras de l'utilisateur. Comme chaque personne a une taille différente, cela peut engendrer des problèmes si l'interface n'a pas été conçue pour s'adapter à la physiologie de chaque utilisateur. La sélection d'objets se fait de manière intuitive en refermant les doigts de la main (attraper un objet) ou en pointant avec l'index (activation d'un bouton sur un menu virtuel).

Un des principaux problèmes avec l'approche naturaliste est que dans bien des cas, les SRV actuels ne permettent pas une interaction naturelle. Par exemple, la capacité de se déplacer librement dans une scène virtuelle n'est généralement pas une tâche simple dans un SRV. Le problème vient du fait que pour recréer ces EV, on doit recourir à des dispositifs d'interface qui imposent leurs propres contraintes à l'utilisateur. Ces contraintes prennent souvent la forme d'une réduction de la mobilité de l'utilisateur. Par

exemple, le port d'un casque de visualisation immersif ne permet pas à son utilisateur de voir la scène physique (du monde réel) qui l'entoure lorsqu'il est en immersion. Il ne peut donc pas marcher librement tout en utilisant le casque de visualisation immersif. Il risquerait de trébucher dans des obstacles dans la pièce où il se trouve. Le simple fait de se tenir debout et de porter un casque de visualisation immersif peut causer un problème. En plus de bloquer la vue de l'utilisateur, la plupart des casques de visualisation immersifs actuellement en utilisation ont recours à des fils pour permettre la transmission des images et du son entre les générateurs d'image du SRV et le casque lui-même. Ces fils posent eux aussi un problème majeur de mobilité. Même lorsqu'un casque de visualisation immersif n'est pas utilisé, ces limitations persistent. Par exemple, l'utilisation d'écrans par projection comme la voûte d'immersion délimite un volume opérationnel pratiquement aussi restreint que pour le casque de visualisation immersif. L'utilisateur ne peut se déplacer que de quelques mètres à l'intérieur d'un volume cubique. Dès qu'un objet virtuel se trouve à une distance supérieure aux limites physiques imposées par le dispositif d'affichage, les méthodes naturalistes ne fonctionnent plus. Dans le monde réel, la solution consisterait simplement à marcher vers cet objet afin de rendre l'objet à portée de main. Le problème est que dans un SRV, comme nous venons de le voir, les méthodes naturelles comme la marche ne sont plus utilisables. Certains systèmes appelés « VR treadmill devices » ont été développés pour permettre la marche dans un SRV. Il s'agit typiquement d'un dispositif apparenté aux tapis roulants utilisés pour l'entraînement physique. Les plus sophistiqués permettent un déplacement dans toutes les directions sur 360 degrés autour de l'utilisateur. Leur succès est limité étant donné la complexité de la tâche, malgré son apparente simplicité. Ce que nous venons d'analyser est ni plus ni moins que le paradoxe de la RV : une technologie censée offrir une interface humain-machine naturelle, mais dont les moyens technologiques actuels ne permettent qu'une interaction qui reste encore artificielle et incomplète. L'exemple précédent de la marche ou de la course représente très bien un des défis auquel la RV fait face : comment permettre à un humain de courir sans courir?

La seule voie prometteuse semble être le contrôle des influx nerveux avec une interface directe avec le cerveau qui permettrait en quelque sorte de placer l'utilisateur en état de rêve éveillé où le rêve est contrôlé par le SRV. Tout cela relève encore du domaine de la science-fiction, mais certaines recherches présentement en cours ouvrent tranquillement des portes dans cette direction.

Plusieurs approches d'interaction non naturaliste ont été mises de l'avant afin de réduire les limitations des méthodes naturalistes. Une de ces techniques nommée « Go-Go » fut développée par Ivan Poupyrev et al. (Poupyrev, Billinghurst, Weghorst et Ichikawa 1996). Cette technique consiste à transformer la position de la main de l'utilisateur suivant une équation non linéaire ayant une forme exponentielle. Lorsque la main de l'utilisateur est à proximité du corps de l'utilisateur, les mouvements de la main virtuelle correspondent à la position réelle de celle-ci. Par contre, lorsque la main dépasse une certaine distance de seuil, la main virtuelle se déplace non linéairement, suivant une échelle supérieure à un, en fonction de la distance. L'utilisateur a l'impression que sa main est téléportée de manière élastique à une distance pouvant atteindre plusieurs mètres de lui. De là provient l'origine du nom de cette technique, en référence au personnage de la série pour enfant « l'inspecteur gadget », dont l'appellation anglaise « Go-Go » a été dérivée en référence à sa main extensible.

La technique du pointeur laser (angl. : « Laser pointer » ou « Ray-casting ») consiste à pointer du doigt un objet distant (Jacoby, Ferneau et Humphries 1994; Bowman 1999; Poupyrev, Weghorst, Billinghurst et Ichikawa 1998; Mine, Brooks et Sequin 1997). Un faisceau lumineux partant du doigt de l'utilisateur se propage en ligne droite selon la direction dictée par celui-ci jusqu'à ce qu'il y ait intersection avec un objet de la scène. Par la suite, selon une gestuelle prédéterminée de la main, l'utilisateur peut sélectionner ou effectuer d'autres opérations sur l'objet. Le problème avec cette technique se trouve au niveau de la précision de pointage. Comme le faisceau passe au centre du doigt de l'utilisateur, de faibles rotations de la main ou du doigt induisent des mouvements

prononcés de la droite projetée dans l'espace tridimensionnel. On peut expliquer ce phénomène par l'effet levier créé par la distance de parcours de la droite, ainsi que par la proximité des deux points définissant cette droite. Dans le cas présent, ces deux points sont approximativement les deux extrémités du doigt, c'est-à-dire le bout du doigt et le joint reliant celui-ci à la main. Plus l'intersection avec un objet est loin de l'origine du faisceau (le doigt), plus l'imprécision sera grande.

La technique nommée « aperture technique » (Forsberg, Herndon et Zeleznik 1996) fut introduite afin de remédier à certaines limitations posées par la technique du pointeur laser (ray-casting). Forsberg note entre autres que l'utilisation de la technique du pointeur laser est imprécise dû au bruit induit par les senseurs de position ainsi que par la stabilité de la main de l'utilisateur. Sa technique « aperture » reprend le principe du pointeur laser mais en introduisant une variante. Dans sa technique, les deux points servant à définir la droite dans l'espace sont donnés par la position de l'œil dominant de l'utilisateur qui donne l'origine de la droite et la main qui donne le second point. Ainsi, l'effet levier est grandement réduit car la distance entre les deux points sur la droite est plus grande. En plus, comme l'œil est situé à l'origine du faisceau, il est plus facile de viser précisément sur un objet en ligne de vue.

Une technique semblable nommée « image plane interaction technique » (Pierce 2000; Pierce, Forsberg, Conway, Hong, Zeleznik et Mine 1997) permet la sélection d'objets distants en resserrant les doigts de la main (l'index et le pouce) sur l'objet, en ayant celui-ci en ligne de vue. Une ligne d'intersection invisible est calculée à partir des yeux de l'utilisateur, en passant au centre des deux doigts de la main, jusqu'à l'objet de la scène le plus proche. Lorsque les doigts se referment de manière à toucher les parties supérieures et inférieures de l'objet, celui-ci se trouve sélectionné.

Il existe une troisième variante à cette approche par intersection qui porte le nom de « spotlight selection » ou encore « flashlight selection » (Poupyrev, Weghorst, Billinghurst et Ichikawa 1998) (Mine 1995). Cette technique utilise le même principe

que la technique « Ray-casting » à l'exception que plutôt d'utiliser un faisceau étroit, cette technique utilise un cône formant un volume. Le calcul d'intersection s'effectue donc sur le volume du cône plutôt que sur une ligne infinitésimale dans l'espace. Cela permet d'accroître la facilité de sélection d'un objet lorsque celui-ci est à une distance réduite de l'utilisateur, considérant la taille de l'objet par rapport au cône. Par contre, plus la distance de l'objet est grande, plus cette technique devient difficile d'utilisation car le volume s'élargit et il devient facile de sélectionner plusieurs objets par erreur.

La technique d'interaction « HOMER » (Bowman et Hodges 1997) (Hand-centered Object Manipulation Extending Ray-casting) introduite par Doug Bowman se base sur les techniques de type « ray-casting » mais en y apportant une variante. Dans la technique HOMER, lorsque l'utilisateur vise un objet distant dans la scène, la main virtuelle de l'utilisateur se déplace sur le rayon jusqu'à ce qu'elle soit positionnée sur l'objet pointé. Cette technique tente de réunir les avantages de la manipulation directe avec celles de la technique de type « ray-casting ». En effet, la manipulation directe reste la méthode la plus intuitive pour manipuler des objets qui sont à portée de l'extension du bras de l'utilisateur. Par contre, lorsque l'objet est au-delà de cette zone, la manipulation directe ne peut pas être utilisée, à moins de préalablement effectuer un déplacement de l'utilisateur. Pour cette raison, le fait de téléporter la main virtuelle à distance permet à l'utilisateur de conserver son sens proprioceptif, en ce qui a trait à une manipulation naturelle de l'objet.

Mark Mine propose la mise en œuvre de techniques d'interaction qui sont spécifiquement basées sur la proprioception chez l'humain (Mine, Brooks et Sequin 1997). Ces techniques ont en commun d'être relatives au corps de l'utilisateur plutôt qu'à une position absolue par rapport à l'environnement virtuel.

Un exemple de techniques utilisant ce principe est le « Two-handed flying ». Cette technique consiste à utiliser les deux mains pour définir un vecteur de déplacement de l'utilisateur. En plus de passer par les deux mains de l'utilisateur, la longueur du vecteur, défini par la distance séparant les deux mains, indique la vitesse de déplacement.

Il propose une technique qu'il nomme « automatic scaling ». Cela consiste à dynamiquement changer l'échelle d'un objet ou d'une portion de scène selon une équation prédéterminée. Il place le pivot de changement d'échelle de manière à ce que l'utilisateur n'ait pas réellement connaissance de la transformation. L'objet semble se rapprocher, mais il occupe toujours le même cône de vision angulaire. Le résultat de cette opération est que l'objet est réduit et translaté près du corps de l'utilisateur de manière à ce qu'il puisse interagir avec l'objet par manipulation naturelle.

Il suggère également de placer les divers éléments formant les menus et widgets de l'IHM relatifs au corps de l'utilisateur, dans le champ de vision de celui-ci ou non. Par exemple, il suggère de placer un panneau de dialogue au-dessus du champ de vision de l'utilisateur. De cette manière, lorsque ce panneau n'est pas utilisé, il n'obstrue pas le champ de vision de l'utilisateur. Lorsque l'utilisateur a besoin de ce menu, il effectue simplement un mouvement avec sa main de manière à saisir le menu dans le haut de son champ de vision, et il descend celui-ci par un mouvement de glissement vers le bas.

Globalement, il propose d'utiliser une approche similaire à un ouvrier transportant ses outils à la ceinture, sur son corps. Il est effectivement possible d'imaginer un mécanisme permettant de déplacer divers outils de type widgets autour du corps de l'utilisateur, selon les besoins de celui-ci.

La téléportation à l'intérieur d'un environnement virtuel est une technique d'interaction qui a fait l'objet de certaines études. D. Bowman évoque les problèmes de désorientation que peut rencontrer l'utilisateur (Bowman, Hodges, et Bolter 98). Il suggère de faire en sorte que la transportation de l'utilisateur dans l'espace se produise suivant une

animation régulière et à une vitesse suffisamment lente pour permettre à l'utilisateur de suivre le mouvement.

En 2005, l'étude publiée par Mulder (Mulder 2005) a ceci d'intéressant qu'elle analyse les performances sur la sélection d'éléments d'interface sur des menus, en considérant à la fois un périphérique 2D (une souris) et des dispositifs de pointage 3D. Les résultats observés sont que la souris est la plus rapide ce qui n'est pas réellement surprenant étant donné qu'elle offre une base de repos (la surface de la table) qui permet de stabiliser les mouvements. Autre fait intéressant, dans les dispositifs de pointages 3D, c'est en mode orthogonal que les performances sont les meilleures. Ce mode utilise une ligne perpendiculaire aux menus, similairement à ce que nous avons fait dans le cadre du système de visée, dont le mode de fonctionnement sera décrit dans un chapitre ultérieur. Nos résultats avec le système de visée confirment des performances accrues à cet égard.

La même année, Billinghurst et al. (Billinghurst, Grasset, et Looser 2005) publient un article traitant des lignes directrices pour le design d'interfaces pour les systèmes de réalité augmentée. Ils présentent les thèmes généraux ainsi que les principes de base proposés par Norman. Ils appuient également l'approche naturaliste en créant des interfaces qui font appel au savoir acquis des utilisateurs. Ils introduisent principalement la notion de « réalité augmentée tangible », issue des concepts propres aux interfaces tangibles (angl. : tangible user interfaces ou TUI). Les deux principes de base de cette approche sont : 1) que chaque objet virtuel est attaché à un objet réel et que 2) l'utilisateur interagit avec l'objet virtuel en manipulant l'objet réel associé. Ils présentent quelques applications types telles que le « magic lens » qui permet de voir une version différente d'une portion de la scène virtuelle par la manipulation d'un pointeur réel associé. Les principes qu'ils présentent sont aussi utilisables d'un point de vue d'un système de RV comme ceux qui sont considérés dans cette thèse. Nous avons d'ailleurs utilisé plusieurs des principes qu'ils énumèrent dans le cadre de nos travaux.

1.3.3 Les métaphores visuelles

L'idée d'utiliser des menus virtuels à l'intérieur d'un SRV n'est pas nouvelle. En 1992, Ellis et Jacoby (Jacoby et Ellis 1992) publient les résultats de leurs recherches à propos d'interfaces pour SRV basés sur des menus virtuels. Ils décrivent les limitations de l'époque de ce type d'interface : la résolution et le champ de vision du dispositif de visualisation, le bruit de lecture et les délais de propagation des dispositifs de suivi de position et la fatigue de l'utilisateur causée par une utilisation prolongée de périphériques de pointage comme le gant numérique. Une des conclusions de leurs travaux est qu'une utilisation importante de gestes de la main n'est pas recommandée. Un autre constat est qu'une rétroaction insuffisante de l'IHM diminue l'efficacité de celle-ci. Ils observent également qu'il est difficile pour l'utilisateur d'évaluer avec précision la position du pointeur virtuel (la main de l'utilisateur) relativement à un panneau de dialogue. Leur contribution à la recherche sur les IHM pour SRV forme la base des recherches qui suivront par la suite. Ils font ressortir la nécessité de respecter les quatre critères de base de conception d'IHM tels qu'énumérés par Donald Norman¹ et repris par la suite par (Bowman et Hodges 1995). Ces critères sont : l'affordance, la correspondance (angl. : mappings), la rétroaction et les contraintes.

En 1994, Rudy Darken introduit le concept de menus 2D superposés au champ de vision de l'utilisateur (Darken 1994). De plus, il propose une interface utilisant la commande vocale plutôt que les dispositifs de pointage utilisant la main de l'utilisateur. Encore ici, il utilise le concept de contraintes pour que les tâches 2D soient effectuées en utilisant un espace à 2 dimensions. Ce qui ressort de cet article est le fait que les périphériques d'entrée ainsi que les techniques d'interaction ne sont pas adéquats pour permettre une interaction avec des éléments d'interface de type WIMP. Les interfaces de type WIMP sont donc considérées comme inadaptées aux EV dû aux faiblesses des techniques

¹ Voir l'ouvrage "The Design of Everyday Things" de Donald Norman.

d'interaction et périphériques d'entrée et non pas des interfaces WIMP elles-mêmes.

Le « Virtual Tricorder » introduit en 1995 par Matthias Wloka et Eliot Greenfield (Wloka et Greenfield 1995) utilise un autre concept de base en conception d'IHM, la correspondance (angl. : mapping). Ils créent une représentation virtuelle du périphérique auquel est attaché un menu virtuel. Ce menu contient des informations textuelles et graphiques. Lorsque l'utilisateur manipule le périphérique de pointage RV, il voit les répercussions de ses actions sur la représentation virtuelle du périphérique. Ceci permet une rétroaction efficace à l'utilisateur, qui est un autre élément de base précédemment mentionné. Comme l'interface spécifique est générée par le menu virtuel attaché au périphérique, ce système a la particularité d'être configurable du point de vue logiciel. L'intérêt majeur de ce système est donc de pouvoir réutiliser un périphérique de pointage RV générique avec plusieurs SRV ayant des objectifs et besoins différents.

Mark Mine introduit plusieurs concepts importants concernant les panneaux de dialogue (Mine 1996). Un des principaux points sur lequel il élabore est celui de la proprioception chez l'humain. Il exploite également les interactions utilisant les deux mains de l'utilisateur. Il propose un système de menus de manière à ce que celui-ci soit attaché à la main gauche (non dominante pour un droitier) alors que la main droite sert à effectuer les opérations de pointage et de sélection sur ces menus. La méthode de pointage qu'il utilise est celle du pointeur laser. Les menus qu'il présente permettent de contrôler divers paramètres du monde virtuel dans lequel se trouve l'utilisateur. Il présente des éléments d'IHM classiques tels que des boutons et des champs d'affichage pouvant contenir du texte ou des chiffres. Il décrit également ce qu'il appelle un « tear-off object palette » qui est similaire aux IHM visuelles de type « World in miniature (WIM) » (Stoakley, Conway et Pausch 1995).

Dans leur SRV qu'ils nomment « CHIMP », ils permettent à un utilisateur d'attacher plusieurs menus simultanément à la main non dominante de celui-ci. Seulement un menu est visible à la fois afin d'éviter l'encombrement visuel. L'utilisateur peut ainsi naviguer

à travers ces multiples menus en effectuant une rotation du poignet de sa main non dominante. Chaque mouvement de rotation effectue un changement de menu. Il propose en quelque sorte l'idée d'un « carrousel de menus tournant » contrôlé par une gestuelle donnée que D. Bowman a reprise plus tard avec sa technique d'interaction « TULIP » (Bowman et Wingrave 2001). Dans le cas de l'interface TULIP, des éléments du menu comparables à des boutons avec texte sur leur surface sont disposés un à un à l'extrémité de chaque doigt de la main de l'utilisateur. La sélection d'un élément du menu se fait par une flexion du doigt correspondant. Cette méthode d'interaction combine à la fois une technique d'interaction gestuelle et des éléments de menus virtuels. Selon les résultats de recherche présentés, la technique TULIP s'est révélée être légèrement inférieure en terme de performances face aux panneaux de dialogue.

Certains chercheurs dont Coninx ont essayé d'analyser le niveau de performance pouvant être réalisé en utilisant des interfaces 2D, telles que rencontrées dans les systèmes d'exploitation comme X-Windows / Motif, à l'intérieur d'un environnement 3D (Coninx, Van Reeth, et Flerackers 97). Leur motivation provient du fait que ces interfaces sont déjà bien connues de l'utilisateur. En réutilisant les mêmes contrôles dans un environnement 3D, l'utilisateur n'a pas à réapprendre l'utilisation de ceux-ci. Dans leur implémentation, ils utilisent directement l'interface fournie par X-Windows / Motif. Pour intégrer ces contrôles dans la scène virtuelle tridimensionnelle, ils dupliquent les contrôles 2D de façon à présenter une copie exacte aux deux yeux de l'utilisateur. De cette manière, ils peuvent simuler un plan 2D dans l'espace 3D de l'utilisateur. Pour interagir avec les menus 2D, ils ont créé une routine logicielle permettant d'adapter les données reçues d'un Pinch Glove afin de les convertir en événements souris / clavier compatibles avec l'environnement X-Windows / Motif, comme si l'utilisateur était en train de travailler à une console 2D.

Gordon Kurtenbach et al. proposent l'utilisation de la transparence pour minimiser l'encombrement généré par l'interface. Ils placent divers contrôles sur une tablette virtuelle qu'ils nomment « toolglass palette » (Kurtenbach, Fitzmaurice, Baudel et Buxton 1997). Ils poussent le concept de transparence un peu plus loin en permettant à l'utilisateur de pointer et sélectionner une icône tout en ayant la palette au-dessus d'un objet de l'environnement. Par exemple, si la palette affiche un choix de couleurs, l'utilisateur peut placer la palette au-dessus d'un objet et par la suite sélectionner une couleur. La couleur se trouve affectée à la surface située dessous. La transparence de la palette permet ce genre d'interaction que les auteurs nomment « click-through ». De plus, leur interface n'est pas statique dans l'environnement. L'utilisateur peut déplacer la palette de contrôles avec sa main non dominante. Ils utilisent le même concept que Mark Mine dont nous avons précédemment discuté.

En 2000, Robertson et al., formant une équipe de recherche chez Microsoft Corporation, publient leurs travaux sur un environnement WIMP 3D, la « task gallery » (Robertson, van Dantzich, Robbins, Czerwinski, Hinckley, Ridsen et al. 2000). Ce système est mis en place par-dessus l'environnement WIMP 2D standard Microsoft Windows. Il transforme le bureau de travail standard de cet environnement par une vision tridimensionnelle d'une pièce virtuelle comportant des murs, un plafond et un plancher. L'utilisateur peut se déplacer dans cette pièce afin d'atteindre des panneaux de dialogue qui sont accrochés aux murs ou flottants dans le vide. Leurs résultats de recherches s'avèrent peu concluants dû à un nombre de participants insuffisant. À la base, un tel système est difficile à utiliser dû à l'incompatibilité des environnements en cause, soit l'environnement virtuel 3D et celui du PC sur lequel cet environnement s'exécute. Le problème vient du fait que les dispositifs de pointage standards d'un environnement WIMP 2D, le clavier et la souris, ne conviennent pas à une interaction avec un environnement 3D. SUN Corporation travaille actuellement à mettre au point un environnement similaire pour les environnements WIMP 2D basés sur le système d'exploitation Linux. Malheureusement, il est à prévoir qu'ils rencontreront les mêmes

problèmes étant donné l'incompatibilité entre les dispositifs de pointage 2D et ces EV 3D. C'est pour cette raison que nous avons posé comme restriction de ne considérer que les environnements utilisant des dispositifs de pointages 3D dans le cadre de nos travaux de recherche.

La même année, N. Kim et al. publient un article intitulé « Multimodal Menu Presentation and Selection in Immersive Virtual Environments » (Kim, Kim, Park, Lee, et Lim 2000). Dans cet article, ils présentent une étude de l'impact du type de représentation des panneaux de dialogue, ainsi que de leur positionnement relatif à la scène et à l'utilisateur. Pour le positionnement du panneau de dialogue, ils considèrent les trois cas suivants : fixe par rapport à l'EV, fixe par rapport à la vue de l'utilisateur et fixe par rapport à un objet à l'intérieur de l'EV. Ils étudient également divers arrangements de menus textuels à l'intérieur de ces panneaux de dialogue qu'ils nomment : pop-up, pull-down, fix stack, basket stack, object pop-up, object pull-down et oblique-layered. Ils ont également évalué l'impact de trois méthodes d'interaction avec ces panneaux de dialogue : le suivi de position de la main, l'interprétation gestuelle de la main et finalement la commande vocale. Leur étude a malheureusement plusieurs lacunes. Une d'entre elles est de ne pas avoir utilisé le même dispositif de pointage pour l'ensemble de leurs expériences. Ceci rend leurs résultats expérimentaux sensibles à l'influence du type de matériel RV utilisé. Or, nous savons qu'il existe des différences de performance entre ces dispositifs de pointage. Un second problème avec cette publication est l'interprétation que les auteurs font des résultats qu'ils présentent. Selon leurs résultats, dans l'ensemble, ce sont les tests utilisant le suivi de la main qui montrent en général les temps d'exécution les plus courts. Or, leur conclusion est que ce sont en fait les tests utilisant l'interprétation gestuelle de la main qui présentent les meilleurs résultats. Un autre tableau donne les résultats en fonction du type de positionnement des panneaux de dialogue. Selon ce tableau, ce sont les panneaux de dialogue fixes par rapport à la vue de l'utilisateur qui sont les plus performants. Bien que cette publication aille dans le sens de nos travaux, il est difficile de se prononcer sur la crédibilité de leurs

résultats et de les utiliser à l'intérieur nos travaux considérant les nombreuses contradictions trouvées dans cette publication.

En 2001, R. Lindeman publie une recherche sur l'impact des contraintes et des rétroactions physiques sur l'efficacité d'interaction avec une surface virtuelle (c.-à-d., un contrôle comme un bouton virtuel) (Lindeman, Sibert et Templeman 2001). Les conclusions de ses recherches sont que l'utilisation de contraintes seules sur des contrôles virtuels n'a pas d'impact significatif alors que l'utilisation d'une surface d'interaction physique comme les dispositifs « pen & tablet » permet une augmentation significative de performance. Un problème potentiel avec cette étude est qu'ils ont utilisé un casque de visualisation immersif monoscopique. Il est probable que l'absence d'informations visuelles stéréoscopiques ait eu un impact significatif sur les résultats de ces recherches. La procédure d'expérimentation consistait à manipuler des contrôles virtuels sur une surface représentant un menu virtuel. Le fait de ne pas pouvoir évaluer la distance de cette surface en l'absence de stéréoscopie ne peut que diminuer les probabilités d'atteindre et de manipuler efficacement les contrôles. Bien que cette expérience donne des indices intéressants, il serait nécessaire de refaire l'expérimentation avec des équipements RV plus performants. Ceux-ci devraient minimalement permettre l'utilisation de la vision stéréoscopique pour permettre l'évaluation des distances d'objets à proximité.

La même année, D. Bowman et al. publient un article intitulé « An Introduction to 3-D User Interface Design » (Bowman, Kruijff, LaViola, et Poupyrev 2001). Cet article résume la situation des IHM en RV à cette époque. Ils parlent entre autres des « system controls » qui incorporent ce que nous appelons les « interfaces à base de métaphores visuelles ». Ils réitèrent ce que nous avançons précédemment, soit qu'un des problèmes de création d'interfaces IHM pour RV provient du fait que nous devons travailler dans le domaine du 3D plutôt qu'en 2D. Nous allons effectivement plus loin, en posant qu'il y a une incompatibilité entre les deux types d'environnements.

One of the basic problems of VE system control is that a normally one- or two-dimensional task becomes three-dimensional, which reduces the effectiveness of traditional techniques (Bowman, Kruijff, LaViola, et Poupyrev 2001).

Ils font une remarque qui attire notre attention :

“... most efficient selection techniques are essentially 2-D” (Bowman, Kruijff, LaViola, et Poupyrev 2001).

Cette affirmation est lourde d’implications. Elle fournit potentiellement une partie de la solution au problème de création d’une technique d’interaction efficace avec des panneaux de dialogue dans un contexte d’environnement 3D. Le fait d’utiliser une technique essentiellement 2D à l’intérieur d’un environnement 3D revient à imposer certaines contraintes de manipulations. Par exemple, nous pourrions forcer la main virtuelle à suivre le plan du menu lorsque celle-ci est suffisamment proche du menu. Nous verrons plus loin ce que ceci implique dans nos recherches.

En 2002, Bowman et al. publient un article sur l’utilisation d’un « pinch glove » pour permettre l’exécution de certaines tâches comme la sélection d’éléments d’un panneau de dialogue (Bowman, Wingrave, Campbell, Ly, et Rhoton 2002). Leur approche consiste à coupler leur technique de menus « TULIP » à ce périphérique RV qui permet le déclenchement d’actions par le fait de faire toucher deux doigts de la main ensemble. Ce qui nous intéressera davantage dans cet article, c’est la portion où ils discutent des performances de leur système afin de manuellement entrer du texte à l’intérieur du SRV. Leurs résultats sont très pauvres avec des temps de 3 minutes en moyenne pour entrer une phrase comportant de 6 à 8 mots.

En 2003, des étudiants de l’École Polytechnique Fédérale de Lausanne, dans le cadre d’un projet semestriel du VR Lab, ont réalisé un projet dans lequel ils expérimentent avec diverses approches d’IHM RV (Huizink, Collot et Lemoine 2003). Ils ont mis au point un menu qu’ils nomment « la palette ». Quoique le concept proposé ne soit pas

nouveau, leur implémentation est intéressante à certains égards. La « palette » consiste en un menu de forme quasi circulaire, divisé en sections. Chaque section comporte une icône graphique représentant une tâche du SRV. Ce menu est attaché à la main gauche (non dominante) de l'utilisateur, tandis que l'autre main permet la sélection d'un élément du menu. C'est en quelque sorte un dispositif de type « pen & tablet » sans utiliser de tablette physique. Ce qui est intéressant de leur approche, c'est qu'ils ont incorporé à ce menu une section d'affichage qui prend la forme d'un rectangle disposé au-dessus du menu circulaire. Cet afficheur permet de retourner diverses informations à l'utilisateur quant au statut actuel d'une tâche ou de sélection d'un élément de menu par exemple.

La même année, Lemoine, Vexo et Thalmann publient un article basé sur les travaux de ces étudiants. Ils pointent plusieurs problèmes rencontrés lors de leurs essais expérimentaux avec des panneaux de dialogue. Par exemple, le fait de placer le menu à hauteur de tête pose un problème de fatigue sur une utilisation prolongée de ceux-ci. La sélection d'éléments de menus par interaction directe a également été citée comme problématique due à une utilisation inefficace des mains. Le commentaire qu'ils font en conclusion est particulièrement intéressant :

"... as with the integration of the mouse to the PC, we must now find an efficient mean to interact in VE, because we are not anymore in the age of the typewriter, keyboard, and mouse, it is good to innovate and found the best way to interact with the new free space. Perhaps, using 2D space desktop all the time is maybe an inhibitory parameter that prevents us to create good 3D interfaces." (Lemoine, Vexo et Thalmann 2003)

Si l'on pousse le raisonnement, on peut en venir à la conclusion que les dispositifs RV matériels imposent des limites sur les innovations qui sont possibles en terme d'IHM dans le domaine de la RV. Cela est probable car, comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, le premier niveau d'interface RV dans la chaîne de communication entre l'utilisateur et la machine est formé par les dispositifs matériels RV, les périphériques d'entrée de données. Il est donc raisonnable de croire que, si ces

dispositifs matériels imposent des restrictions, les niveaux d'interface RV supérieurs ne pourront faire plus que ce qui est possible, compte tenu des informations provenant des niveaux précédents.

Une des publications les plus pertinentes en ce qui concerne notre projet de recherche est parue en 2003 (Larimer et Bowman 2003). Dans cette publication, les auteurs décrivent des tests qu'ils ont effectués avec des panneaux de dialogue dans un EV. Leur expérience a principalement porté sur l'ouverture, la fermeture et le déplacement des panneaux de dialogue. Comme ils le mentionnent, cette publication ne présente que des résultats préliminaires. On ne retrouve pas de résultats quantitatifs dans l'article. Seulement cinq sujets humains ont participé à leur étude expérimentale. Globalement, il est difficile de tirer des conclusions fiables de leur publication étant donné le peu d'information présentée. Les points marquants de leurs résultats sont : des résultats fortement variables d'un sujet à l'autre, les menus sont utilisables bien qu'ils ne soient pas aussi efficaces que leur contrepartie WIMP 2D et finalement que le Wand impose des limites sur la précision de pointage ayant pour effet de rendre la fermeture d'un panneau de dialogue difficile.

En 2005, Kohli et Whitton (Kohli et Whitton 2005) présentent les résultats d'une étude sur les effets de l'utilisation de la main non dominante pour manipuler des éléments d'interface sur un panneau de dialogue. Ce dernier est tenu par la main non dominante alors que la main dominante pointe les éléments d'interface. Leur étude a deux lacunes. La première est que le nombre de sujets n'était que de 8 personnes. Cela nous paraît insuffisant pour tirer des conclusions fiables. La seconde lacune est qu'ils n'ont pas fait de comparaison avec une deuxième technique d'interaction servant de référence. Cela rend leurs conclusions hasardeuses et difficiles à interpréter quant à leur réelle utilité. Nous avons nous-mêmes introduit une approche similaire lors de nos expériences mais, contrairement à leur étude, nous avons comparé cette technique d'interaction avec d'autres.

En 2006, Jurgens et al. (Jurgens, Cockburn et Billinghurst 2006) publient les résultats de leur recherche sur une application de réalité augmentée dont le but est de faciliter la localisation précise de lieux terrestres par l'utilisation d'un pôle (bâton) manipulé par l'utilisateur (un arpenteur par exemple). Ils étudient l'effet de quatre rétroactions visuelles donnant des informations sur les distances d'un objet dans la scène. Ces rétroactions sont : l'ombre, un cercle, une ligne et finalement un afficheur numérique. Fait à noter, le cercle qu'ils nomment le « cast circle » ressemble étroitement à celui utilisé dans la rétroaction visuelle que nous avons introduite et nommée le « système de visée », décrite plus loin dans cette thèse. La ligne qu'ils décrivent ressemble elle aussi à la ligne perpendiculaire que nous avons introduite avec le système de visée. Par contre, contrairement à ce qu'ils ont fait, notre système de visée incorpore ces deux éléments visuels pour former une rétroaction visuelle plus complète et dont le comportement diffère. Leurs conclusions sont similaires aux nôtres ce qui semble appuyer nos propres observations. Globalement, ils observent que le cercle est la rétroaction visuelle préférée des sujets. Ils observent des différences non statistiquement significatives entre les diverses rétroactions visuelles en terme de performance de l'utilisateur.

Une taxonomie des interfaces pour menus de « contrôle » a été publiée en 2006 (Dachselt et Hübner 2006). Elle fait un survol relativement complet des interfaces basées sur les panneaux de dialogue. Les auteurs font le constat que la majorité des interfaces recensées sont de type « menu simple », c'est-à-dire des menus avec généralement moins de 8 éléments pouvant être affichés sur une courte ou longue période de temps. La revue de littérature qu'ils présentent est intéressante, mais la taxonomie elle-même n'apporte pas de réelles réponses sur la position de chacune de ces interfaces les unes par rapport aux autres. Le premier niveau de division de leur taxonomie est fondé sur quatre possibilités : les menus d'options temporaires, les menus simples, les menus systèmes et les menus hiérarchiques. Le problème avec cette taxonomie reste le même que pour les tentatives précédentes. Le choix des critères de division est propre à un besoin bien particulier qui n'est pas nécessairement celui demandé par une application

donnée. Leur taxonomie n'est donc pas suffisamment généralisable à notre avis.

1.3.4 Les autres formes d'interfaces

Il existe d'autres formes d'interfaces utilisables avec les SRV. On pense entre autres aux interfaces sonores qui peuvent être utilisés pour fournir soit des entrées ou des sorties d'information. Malgré que la reconnaissance de la parole existe depuis plusieurs années, elle n'a pas encore atteint un niveau d'acceptation et de maturité d'un point de vue technologique permettant à celle-ci d'être largement utilisée avec des SRV. Cela dit, il est raisonnable de croire qu'à long terme elle deviendra de plus en plus considérée comme méthode complémentaire d'interaction, en combinaison avec d'autres méthodes comme les métaphores visuelles par exemple.

1.4 Problématique

Se basant sur nos connaissances du domaine et inspiré des conclusions ayant ressorti de la revue de littérature, les trois problématiques que nous avons retenues sont :

- Le repère utilisé pour définir la position d'un panneau de dialogue par rapport à celle de l'utilisateur affecte les performances de manipulation des panneaux de dialogue contenus dans un EV mais nous ne disposons pas de suffisamment de résultats de recherche pour déterminer le ou lesquelles permettent les meilleures performances.

Les travaux de Mark Mine (Mine 1997) ont clairement montré l'importance de la proprioception dans nos interactions avec des IHM pour SRV. Par contre, les expériences menées par Mine visent à étudier la différence entre des manipulations à distance sur un objet et des manipulations locales, à portée de la main, utilisant la proprioception fournie par le corps de l'utilisateur. Nous avons identifié plusieurs cas intermédiaires distincts pour lesquels ces recherches ne donnent pas de réponses

adéquates. Il n'existe pas suffisamment de données sur la performance d'interaction avec un objet à l'intérieur d'un EV pour différents repères entre cet objet et l'utilisateur. Dépendamment du repère utilisé pour définir la position et l'orientation d'un panneau de dialogue, nous ne sommes pas en mesure de dire quel sera l'impact sur les performances de manipulation du panneau de dialogue et de ses contrôles virtuels par l'utilisateur. Par contre, les travaux de Mine nous portent à croire qu'il y aura des différences significatives de performances attribuables à ce facteur. Il est donc essentiel d'étudier l'effet qu'aura le repère, utilisé pour définir la position et l'orientation du panneau de dialogue, sur la performance de l'utilisateur.

- Il est difficile d'interagir avec des IHM à l'intérieur d'un SRV dû à l'absence de rétroaction tactile provenant du dispositif d'entrée.

Dans le cas spécifique des panneaux de dialogue flottant dans le vide, il n'y a aucun moyen pratique pour empêcher la main de l'utilisateur de passer à travers le panneau de dialogue. Ceci vient du fait que dans un tel environnement, tous les objets sont virtuels et donc, sans matière permettant de les toucher physiquement. Ceci rend les manipulations avec de tels objets difficiles pour l'utilisateur. Dans la perspective où ces objets sont des éléments d'interface ou des panneaux de dialogue, il est probable que les performances d'interaction de l'utilisateur avec ces IHM seront perturbées par cette absence de rétroaction tactile.

Nous devons proposer des solutions qui permettent de minimiser les impacts de cette problématique sur l'utilisateur. Ces solutions devront permettre de fournir des rétroactions alternatives pour compenser l'absence de rétroactions tactiles.

Comme nous l'avons vu précédemment dans la revue de littérature, il existe bien entendu des dispositifs de pointage permettant cette rétroaction tactile. On pense ici à la tablette et crayon (pen & tablet). Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes fixé comme contrainte de garder une approche indépendante face au matériel RV utilisé. De

ce fait, nous considérons que de tels dispositifs ne sont pas à la disposition de l'utilisateur et que nous devons trouver des méthodes alternatives, en utilisant uniquement des solutions logicielles, pour minimiser ou éliminer le problème rencontré.

Les techniques d'interaction que nous allons étudier devront permettre de restreindre les possibilités qui s'offrent à l'utilisateur, par l'application de contraintes, de manière à limiter les erreurs de manipulation. Par exemple, à proximité d'un panneau de dialogue, une projection selon les axes du plan formant la surface du menu permettra de pointer plus facilement une zone spécifique de ce dernier. Cela aura pour effet de permettre à l'utilisateur de travailler essentiellement sur un plan 2D, même s'il pointe avec sa main dans un espace à trois dimensions.

- Le manque de résolution ou de précision des dispositifs d'entrée / sortie RV peut significativement réduire les performances de manipulations d'IHM à l'intérieur d'un EV.

Les IHM à base de métaphores visuelles comme les panneaux de dialogue et les contrôles virtuels sont particulièrement affectés par ces problèmes de résolution et de précision des dispositifs d'entrée / sortie des SRV. Le problème de résolution des dispositifs d'affichage est plus ou moins prononcé selon le dispositif utilisé. Le casque de visualisation est, à l'heure actuelle, celui qui pose le plus de problèmes de résolution d'affichage. Dans bien des cas, il est difficile d'afficher du texte à l'intérieur d'un casque de visualisation qui soit de dimension équivalente à celle retrouvée dans une IHM 2D classique sur un moniteur d'ordinateur. La tendance actuelle en RV consiste donc à délibérément augmenter la dimension de la fonte du texte de manière à permettre son utilisation dans ce type de dispositif. Cela occasionne une perte d'espace d'affichage et réduit la quantité d'information présentée à l'utilisateur.

Un problème de résolution et de précision existe également au niveau des dispositifs de pointage RV. Il arrive souvent que ces dispositifs retournent des informations de position et d'orientation entachées d'une certaine erreur. Les systèmes de suivi de position magnétique sont particulièrement visés par ce problème. Des distorsions du champ magnétique environnant occasionneront de telles erreurs. Cela aura pour effet de rendre la manipulation et la sélection de contrôles virtuels particulièrement ardues pour l'utilisateur.

Nous devons donc trouver des méthodes alternatives permettant l'utilisation d'objets ou de texte de taille réduite à l'intérieur d'un SRV, tout en préservant l'espace d'affichage disponible et en maximisant la quantité d'information présentée.

1.5 Étendue de la recherche

Le principal objectif de cette thèse est de faire avancer les connaissances sur les panneaux de dialogue utilisés à l'intérieur d'un environnement virtuel afin de permettre la conception d'IHM les plus efficaces possible pour ce qui est de la performance et de la satisfaction des utilisateurs.

Pour atteindre cet objectif, nous allons tester l'impact de diverses caractéristiques des panneaux de dialogue dans les SRV sur la performance et la satisfaction humaine. Les résultats expérimentaux que nous allons obtenir nous permettront de faire des recommandations précises pour la conception et l'aménagement de panneaux de dialogue pour SRV permettant une performance humaine optimale.

Les deux principales caractéristiques des panneaux de dialogue auxquelles nous nous intéressons sont : 1) le repère du panneau de dialogue par rapport à l'utilisateur 2) les effets du manque de rétroaction tactile des panneaux de dialogue sur les performances de l'utilisateur. Nous incluons dans notre étude des techniques d'interaction spécifiquement développées pour adresser la problématique du manque de rétroaction tactile.

Nous avons choisi ces caractéristiques car elles ont le potentiel de minimiser les problèmes de manipulation associés à l'IHM du SRV. De plus, il existe peu de résultats de recherche dans la littérature scientifique sur les effets de ces caractéristiques sur des IHM pour SRV. Les caractéristiques propres au domaine du 2D comme le positionnement ou la couleur des boutons de contrôle sur la surface du menu ont été largement étudiées et documentées dans la littérature relative aux IHM 2D classiques. Nous nous baserons sur les résultats existants pour ce type de caractéristiques, le rationnel étant qu'une grande proportion des résultats de recherche pour les IHM 2D s'appliqueront également aux IHM pour SRV. Nous nous baserons également sur le fait que les menus WIMP 2D standards et les panneaux de dialogue 3D de nos IHM pour SRV partagent un point commun qui est une surface active ayant deux dimensions. Un bouton de contrôle pourra donc aussi bien être utilisé sur un menu d'environnement WIMP qu'un panneau de dialogue d'un environnement 3D. Les caractéristiques comme la position sur le plan 2D de la surface du panneau de dialogue ainsi que la couleur des éléments d'interface suivront donc les mêmes lignes directrices que dans le cas d'IHM 2D classiques.

La performance humaine sera mesurée par le temps d'exécution des tâches ainsi que le nombre d'erreurs de manipulation des sujets durant l'exécution de celles-ci. La satisfaction humaine est une variable subjective qui sera mesurée suivant une échelle de Lickert en plusieurs points, à l'aide d'un questionnaire remis aux sujets participant aux expériences.

1.6 Hypothèses

Voici les hypothèses sur lesquelles s'articule notre travail de recherche.

Hypothèse 1 : Dans les environnements virtuels 3D, le repère utilisé pour positionner les panneaux de dialogue par rapport à l'utilisateur a un impact positif sur la performance de manipulation et la satisfaction de l'utilisateur.

Hypothèse 2 : Dans le contexte de l'utilisation de panneaux de dialogue ne permettant pas de rétroaction tactile, l'utilisation de la technique « système de visée » permet d'augmenter la performance de manipulation et la satisfaction de l'utilisateur comparativement aux panneaux de dialogue n'utilisant pas cette technique.

On entend par « manipulation », la tâche de sélection qui consiste à pointer quelque chose avec le doigt et la tâche de manipulation qui consiste à faire subir une translation ou une rotation à un objet. Par exemple, dans le cas de la manipulation d'un contrôle virtuel de type « gradateur linéaire », la manipulation consistera à : 1) sélectionner (toucher) le curseur du gradateur avec le doigt, et 2) de le faire glisser sur son axe de déplacement au moyen d'une translation.

En ce qui concerne l'hypothèse 1, le positionnement des panneaux de dialogue a été évalué suivant cinq repères. 1) statique dans la scène 2) statique par rapport à la position de l'utilisateur 3) statique par rapport à la position et à l'orientation de l'utilisateur 4) statique par rapport à la main non dominante de l'utilisateur et 5) statique par rapport à la tête de l'utilisateur. Une explication plus détaillée de ce que chaque repère implique sera donnée au chapitre 4.

1.7 Contributions

Les principales contributions de notre recherche de doctorat sont les suivantes :

- Des résultats expérimentaux sur la performance technique et humaine des IHM à base de métaphores visuelles, composées de panneaux de dialogue et de contrôles virtuels, utilisées à l'intérieur d'un SRV.
- Des recommandations pour choisir les caractéristiques les plus efficaces pour produire des IHM à base de métaphores visuelles performantes pour les SRV.
- Des recommandations sur la façon optimale d'utiliser ces caractéristiques pour produire des IHM à base de métaphores visuelles performantes pour les SRV.
- Des prototypes d'IHM offrant le potentiel de standardiser le développement et l'utilisation d'IHM à l'intérieur des SRV.

Il existe à ce jour peu de bibliothèques de programmation permettant le développement d'IHM pour les SRV (Conner, Snibbe, Herndon, Robbins, Zeleznik et van Dam 1992; Bowman, Kruijff, LaViola, et Poupyrev 2001). L'ensemble de ces bibliothèques a été développé de façon intuitive plutôt que suivant une analyse rigoureuse des besoins des utilisateurs actuels de SRV (Bowman 1999; Bowman, Kruijff, LaViola, et Poupyrev 2001). Le développement de bibliothèques d'IHM est essentiel afin de permettre aux SRV de pouvoir continuer leur évolution. L'ampleur des impacts sociaux et économiques est difficilement mesurable en ce moment, mais le développement d'IHM pour SRV ne peut qu'être bénéfique à cet égard. Des études sur des prototypes d'IHM pour SRV stimuleront, nous l'espérons, l'apparition d'IHM standardisées facilitant l'utilisation de SRV. Nous espérons que cela aura un impact positif sur l'efficacité des humains à réaliser des tâches présentement considérées comme difficiles à effectuer, utilisant les technologies ou techniques actuelles.

1.8 Structure de cette thèse

Le chapitre 1 a présenté une vue d'ensemble des IHM utilisées dans le domaine de la RV. Nous avons présenté une revue de littérature donnant l'état actuel des connaissances et des résultats de recherche au sujet de ces IHM pour SRV.

Le chapitre 2 présentera un aperçu des SRV et des composants formant une IHM pour SRV.

Le chapitre 3 présentera la morphologie d'un panneau de dialogue et ses constituants ainsi que des critères permettant des mesures de performance sur ceux-ci.

Le chapitre 4 présentera la première expérience que nous avons réalisée dans le cadre de cette recherche portant sur les cinq repères.

Le chapitre 5 présentera la deuxième expérience que nous avons réalisée dans le cadre de cette recherche portant sur l'étude des trois rétroactions visuelles sélectionnées.

Le chapitre 6 présentera la troisième expérience que nous avons réalisée dans le cadre de cette recherche portant sur l'étude des performances humaines – machine dans un contexte d'application RV concrète pour une tâche longue et demandant un niveau de concentration plus élevé.

Finalement, le chapitre 7 présentera la conclusion de cette recherche. Nous y énumérerons nos recommandations sur le design des panneaux de dialogue utilisés dans un environnement de SRV. Nous identifierons également les limites d'application de nos résultats ainsi que les avenues de recherche futures.

CHAPITRE 2 - LES INTERFACES HUMAIN - MACHINE DANS LE DOMAINE DES ENVIRONNEMENTS VIRTUELS

2.1 Les systèmes de réalité virtuelle

Le domaine de la RV est vaste. Plusieurs systèmes peuvent être catégorisés comme des SRV. Les SRV couvrent des systèmes de simulation n'offrant pratiquement pas d'immersion (SRV de bureau) jusqu'aux systèmes à haut degré d'immersion utilisant des casques de visualisation immersifs et autres dispositifs connus du domaine.

De plus, un SRV comprend plusieurs éléments distincts. Sur le plan matériel, un SRV requiert l'utilisation de périphériques d'entrée / sortie. Ceux-ci peuvent être constitués de composantes standard tels un moniteur d'ordinateur, un clavier et une souris (SRV de bureau) ou de composantes plus spécifiques comme le casque de visualisation immersif et le gant numérique avec senseurs de suivi de position. Un ou plusieurs ordinateurs sont également requis afin de générer l'environnement virtuel. Sur le plan logiciel, un SRV comprend divers composants ou modules. On pense entre autres aux modules de rendu graphique, de simulation des lois physiques, de simulation du modèle virtuel et du module permettant la mise en œuvre d'une IHM. Il est plus difficile d'établir de façon précise quelles composantes logicielles sont utilisées de façon générale dans un SRV. Jusqu'à présent, les SRV ont surtout été définis en fonction du matériel qu'ils utilisent. Il reste encore un large travail de standardisation à faire sur le plan logiciel en RV. De plus, il existe très peu de bibliothèques ou d'outils de conception de SRV commercialement disponibles en 2007 qui permettent la conception et l'intégration aisées d'IHM à l'intérieur de ces environnements virtuels.

En général, on parle d'un SRV lorsque le système utilisé est spécifiquement conçu à des fins de simulations, immersives ou semi-immersives, ayant lieu dans un environnement virtuel. Initialement, le concept de SRV était principalement associé à un système requérant un casque de visualisation immersif et un gant numérique. Les autres variantes

de SRV comme les environnements CAVE ont graduellement émergé par la suite.

Dans ce texte, nous référerons aux SRV tels que décrits dans cette section. De plus, dans le cadre de nos travaux de recherche, nous ne considérerons que les SRV de type immersif et semi-immersif. Nous ne considérerons pas les SRV de type « SRV de bureau » qui utilisent écran, clavier et souris comme principaux périphériques d'interfaces. En d'autres termes, nous ne considérerons que les SRV utilisant des dispositifs de pointage permettant d'obtenir des informations spatiales sur les axes x, y et z. Nous fixons ce prérequis, car il a un impact important sur les méthodes employées pour interagir avec le SRV.

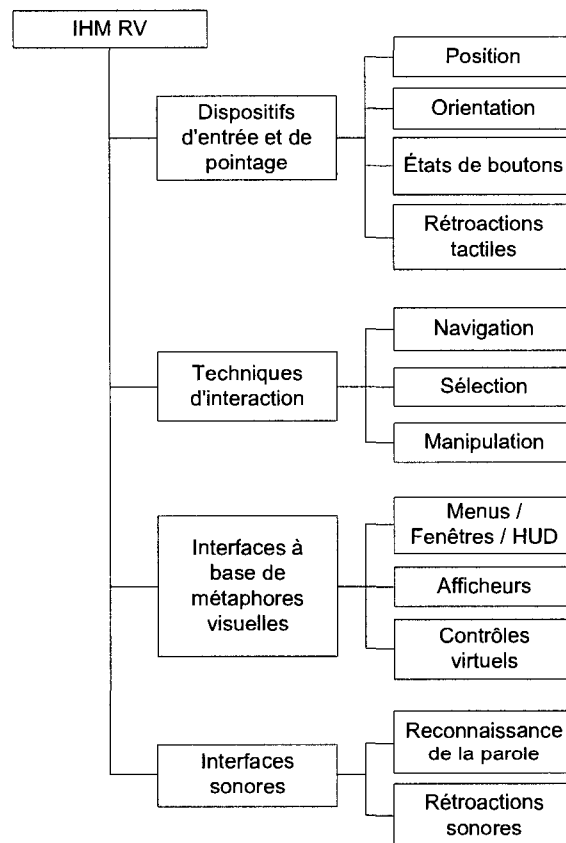


Figure 2.1 : Vue d'ensemble des composantes d'IHM pour SRV

2.2 Composantes des interfaces humain-machine pour des systèmes de réalité virtuelle

Dans cette section, nous présenterons chacune des principales composantes des IHM utilisées dans un SRV et fournirons des points de repère sur les liens qui les relient entre elles. La structure présentée ici n'a pas la prétention d'être complète, mais elle constitue un point de référence suffisant pour permettre au lecteur une compréhension adéquate de ce qui va suivre dans cette thèse. La figure 2.1 donne une vue d'ensemble simplifiée des composantes d'IHM pour SRV.

Les figures qui suivent donnent plus de détails sur chacune des composantes présentées à la figure 2.1.

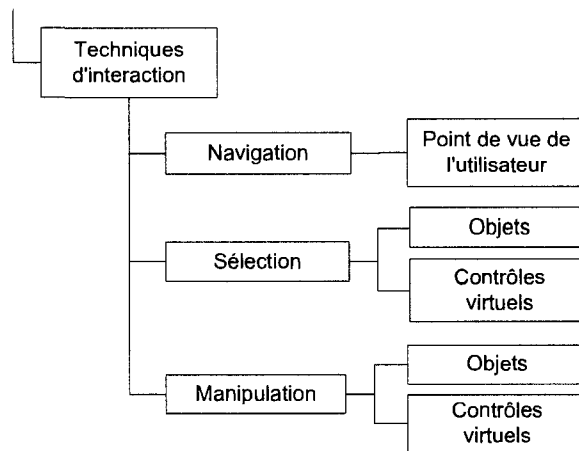


Figure 2.2 : Composantes des techniques d'interaction

Les techniques d'interaction permettent d'effectuer trois grandes tâches : la navigation de l'utilisateur à l'intérieur de l'environnement virtuel, la sélection et la manipulation d'objets dans l'EV. Par objets on entend ici des objets représentant soit des composants spécifiques de la scène virtuelle, soit des contrôles virtuels associés à d'autres objets de la scène.

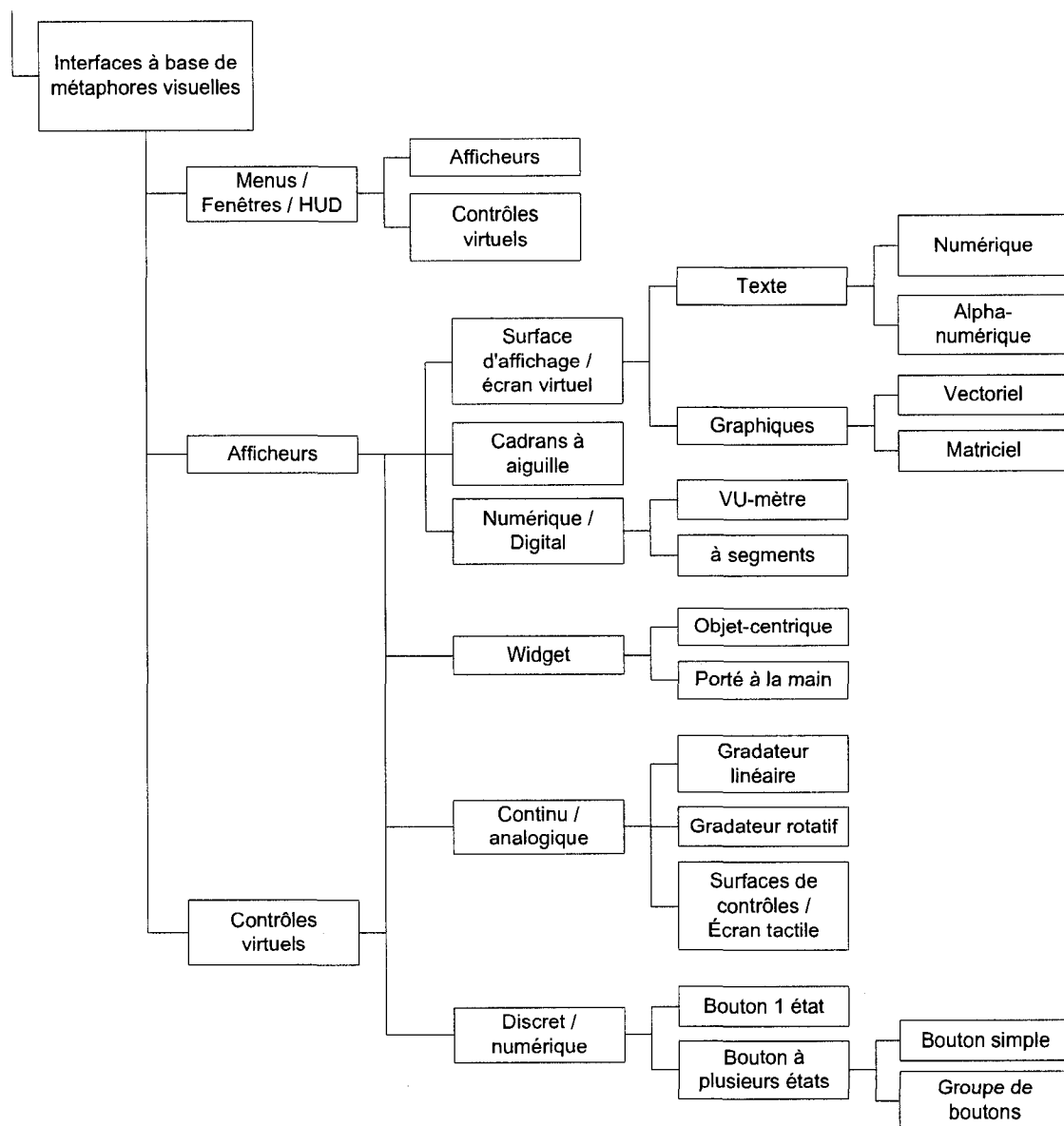


Figure 2.3 : Composantes des interfaces à base de métaphores visuelles

Dans la figure 2.3, on note que les catégories « afficheurs » et « contrôles virtuels » se retrouvent à la fois sous « métaphores visuelles » et « menus / fenêtres / HUD ». Cela s'explique du fait que les afficheurs et contrôles sont des types de métaphores visuelles qui sont autonomes en soi. Ils peuvent être utilisés indépendamment de menus virtuels ou à l'intérieur de ceux-ci. Les menus virtuels sont des entités pouvant contenir des

afficheurs et des contrôles virtuels.

Au niveau des interfaces sonores, il est possible de transmettre des commandes au SRV par le biais de la reconnaissance vocale. Le SRV peut transmettre des informations à l'utilisateur suivant deux méthodes : soit en utilisant des sons 2D, soit en utilisant des sons 3D comportant des indications sur la position exacte de la source sonore dans l'environnement virtuel. La figure 2.4 résume ces possibilités.

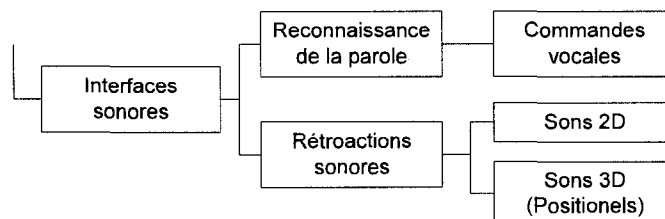


Figure 2.4 : Composantes des interfaces sonores

Lorsque ces composantes sont réunies pour former un SRV, on obtient un système incorporant une boucle d'interaction IHM complète illustrée à la figure 2.5. L'IHM de RV a pour fonction de permettre une communication entre l'utilisateur et un système informatique. On constate une progression logique d'un niveau à l'autre, partant des composantes d'interface uniquement composée de matériels, en allant vers les composantes uniquement composées de logiciels.

Le premier niveau d'IHM de RV est celui des périphériques d'entrée de données. Ceux-ci constituent la base de toute interface d'un SRV. Ils ont été les premiers à attirer l'attention des chercheurs. Un périphérique d'entrée de données est un dispositif matériel permettant à un utilisateur de physiquement communiquer avec un SRV. Sans ce type d'IHM, il serait impossible pour un humain d'interagir avec un SRV. Par contre, ceux-ci offrent une interaction limitée qui se résume à permettre l'acquisition de données de base. On fait référence ici à des données de position et d'orientation, ainsi qu'à des données discrètes telles que l'état de boutons présents sur certains dispositifs de pointage. Certains de ces dispositifs permettent également des retours d'information

sous forme de stimuli physiques tels que des vibrations, de la résistance ou même une opposition au mouvement d'une partie spécifique du corps de l'utilisateur.

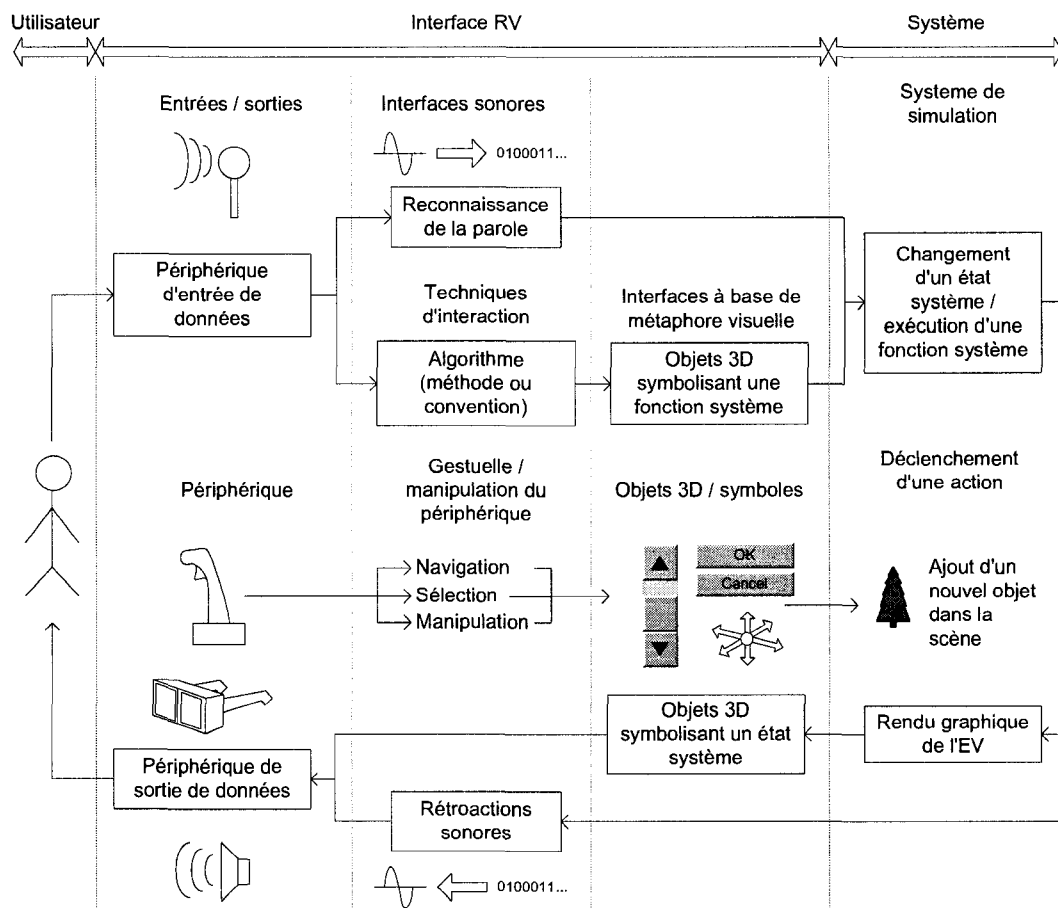


Figure 2.5 : Niveaux d'IHM en RV

Le second niveau d'IHM est celui des techniques d'interaction et interfaces sonores. Les techniques d'interaction sont apparues après les périphériques d'entrée de données, car elles ont besoin des données provenant d'un ou plusieurs périphériques d'entrée de données pour pouvoir opérer. Le but d'une technique d'interaction est de définir une méthode ou une convention permettant à un utilisateur d'interagir avec un SRV, en utilisant des périphériques d'entrée de données. La technique d'interaction peut donc être vue comme un algorithme qui filtre ou transforme les données provenant d'un périphérique d'entrée de données matériel. Ces données sont par la suite acheminées aux

diverses composantes logicielles du SRV. La transformation effectuée sur les données varie d'une technique d'interaction à une autre. Elle prend des informations de base comme une position spatiale, et les transforme en un ensemble de signaux plus complexes, permettant par exemple de saisir un objet virtuel avec la main. Dans ce cas précis, les informations de flexion des doigts de la main sont analysées par l'algorithme de la technique d'interaction. Celle-ci détermine par la suite si ces flexions, considérant d'autres facteurs comme la position d'un objet virtuel, constituent une sélection de l'objet. Les techniques d'interaction permettent donc d'étendre les possibilités des périphériques d'entrée de données. Les interfaces sonores se retrouvent également au niveau 2 car elles impliquent elles aussi une interprétation d'une information provenant d'un périphérique d'entrée de données pour ensuite transmettre une information plus haut niveau aux niveaux supérieurs du SRV. Par exemple, le fait de prononcer le mot « menu » entraînera l'apparition du menu principal devant l'utilisateur.

Le troisième niveau d'IHM est celui des interfaces à base de métaphores visuelles. Elles ont pour but de permettre une interaction plus visuelle entre l'utilisateur et le SRV. Il existe plusieurs types d'interfaces à base de métaphores visuelles. Les « Widgets » se présentent sous forme d'icônes symboliques et forment une famille de contrôles visuels représentant une tâche précise qui doit être effectuée par l'utilisateur à l'intérieur de l'EV. Chaque tâche requiert un Widget différent. Ils ne sont donc pas aisément généralisables. Les menus sont un autre type d'interface à base de métaphores visuelles permettant d'interagir avec des contrôles virtuels comme des boutons ou des gradateurs. Ceux-ci représentent des éléments d'interface classique, dont la fonction est aisément reconnue par l'utilisateur. Il est donc possible de créer des menus et des contrôles qui soient suffisamment génériques pour permettre leur réutilisation dans diverses applications. Les interfaces à base de métaphores visuelles permettent à l'utilisateur d'effectuer des tâches d'interaction indirectes requérant plusieurs niveaux d'interaction (sélection de menus, d'icônes, activation de boutons, ...). Elles permettent d'effectuer des tâches plus complexes que les techniques d'interaction, étant donné la diversité de

possibilités d'interactions qu'elles permettent.

Comme nous l'avons vu à la section précédente, il existe plusieurs niveaux d'IHM pour SRV. Dans cette thèse, nous nous concentrerons sur les interfaces à base de métaphores visuelles. De ce fait, la revue de littérature qui suit présentera les travaux passés ayant porté spécifiquement sur ces dernières. Nous commencerons par présenter les différentes recherches et les résultats de recherche pour, par la suite, présenter une analyse de ces résultats. Enfin, nous soulignerons les éléments pour lesquels il n'existe que peu ou pas de résultats de recherche satisfaisants, nous indiquant la direction à prendre dans ce travail de recherche.

CHAPITRE 3 - CONCEPTS DE DESIGN ET D'ÉVALUATION D'INTERFACE HUMAINES – MACHINE EN RÉALITÉ VIRTUELLE

3.1 Design

3.1.1 Morphologie d'un panneau de dialogue

Bien qu'il existe peu de publications sur les panneaux de dialogue pour SRV, ce type de menu partage plusieurs similitudes avec les menus 2D classiques que l'on retrouve dans plusieurs systèmes d'exploitation connus. C'est pourquoi nous pouvons aller chercher certains éléments de réponse dans la littérature IHM 2D classique afin d'établir la morphologie des panneaux de dialogue 3D. Un des auteurs sur lequel nous avons basé notre description est Aaron Marcus (Aaron Marcus 1997).

La figure 3.1 donne une idée générale de la morphologie typique d'un panneau de dialogue pour SRV. Un panneau de dialogue est constitué des éléments suivants :

- une surface de menu
 - une zone active
 - des contrôles spécifiques
 - une zone statique
 - des bordures
 - des contrôles standards

Le menu en lui-même est un contenant servant à regrouper des composantes d'IHM. Il est formé d'une partie que l'on nomme ici « zone active » et qui est représentée à la figure 3.1 par un rectangle pointillé. La zone active est vide a priori et permet de regrouper un ensemble de contrôles spécifiques (boutons, gradateurs, listes défilantes...) ayant des liens entre eux. Le contenu de la zone active est propre à chaque application et varie suivant les besoins spécifiques en IHM de celle-ci.

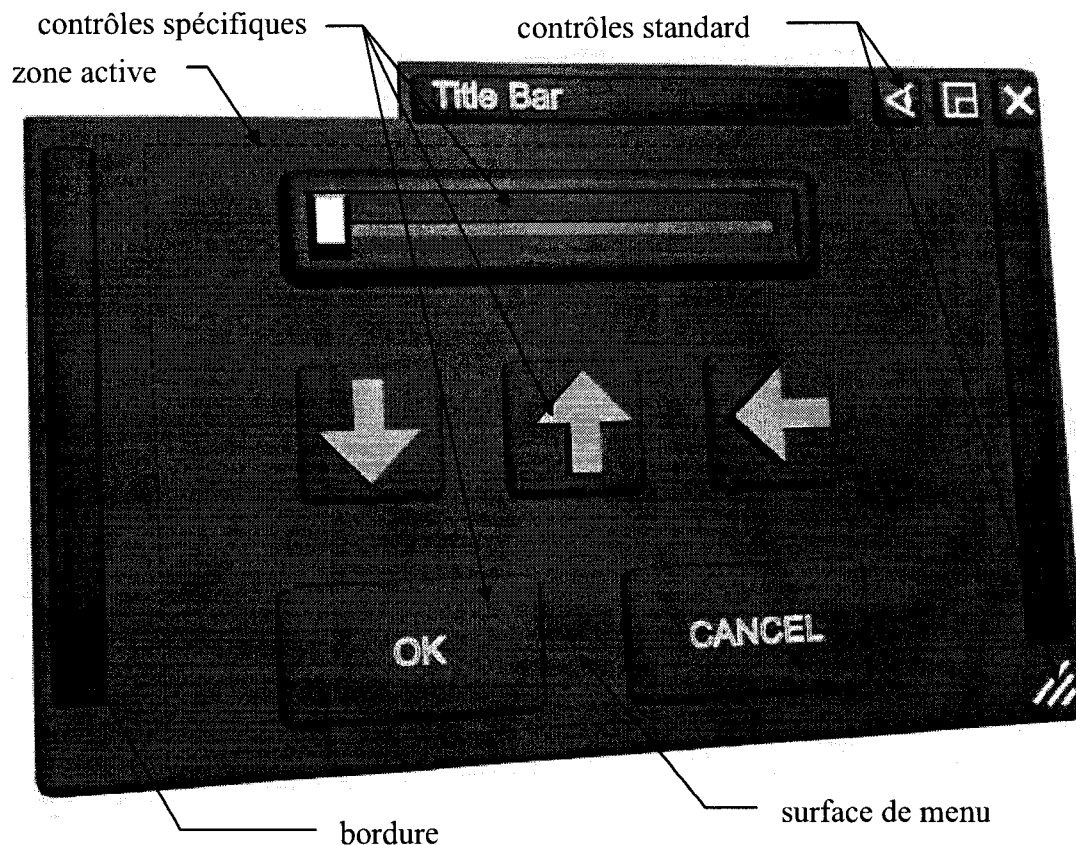


Figure 3.1 : Morphologie générale d'un panneau de dialogue

La zone statique forme la portion générique du menu car les éléments d'IHM qui la composent restent les mêmes peu importe l'application visée. Les éléments qu'elle contient permettent à l'utilisateur d'ajuster certaines caractéristiques du menu selon ses besoins et selon les contraintes de l'environnement virtuel dans lequel il se trouve. La zone statique permet donc une optimisation des performances d'interaction par l'entremise d'ajustements dictés par l'utilisateur comme le changement de position, de taille ou de mode d'attachement du menu par rapport au repère de l'utilisateur.

Tout menu, peu importe le contenu présent dans la zone active, sera doté des mêmes contrôles standards. Ceux-ci permettront à l'utilisateur d'effectuer les opérations de base suivantes :

- Fermeture du menu
- Réduction du menu
- Changement du mode d'attachement du menu
 - Statique dans la scène
 - Statique par rapport au corps de l'utilisateur (en position et en orientation)
 - Statique par rapport à la tête de l'utilisateur
- Changement des dimensions du panneau de dialogue

La surface formant la bordure elle-même sera utilisée pour permettre le déplacement du menu sur six degrés de libertés. Pour ce faire, l'utilisateur n'aura qu'à saisir la bordure avec sa main virtuelle et positionner le menu à la position désirée. Il est à noter que peu importe le mode d'attachement actuel du menu, la bordure permettra en tout temps à l'utilisateur de modifier l'emplacement du menu dans l'espace. Par exemple, si le mode d'attachement est « statique dans la scène », le menu pourra être déplacé à une autre position qui demeurera inchangée par la suite, tant que l'utilisateur ne modifiera pas de nouveau celle-ci. Si le mode d'attachement est « statique par rapport à la tête de l'utilisateur », le menu suivra chaque mouvement de la tête de l'utilisateur par défaut. Par contre, si l'utilisateur saisit le menu par sa bordure, il pourra changer la position relative du menu par rapport à la tête. Une fois cette modification faite, le menu suivra de nouveau les mouvements de tête, avec une position relative modifiée.

Le bouton de fermeture permettra de fermer le menu, de manière inconditionnelle ou avec confirmation de l'utilisateur.

Le bouton de réduction permettra de réduire la taille du menu sans que celui-ci ne soit fermé. Une version miniaturisée du menu apparaîtra en périphérie du champ de vision de l'utilisateur, permettant de libérer son espace de travail (voir la figure 3.2). On note que le menu est réduit en taille et subit une translation ainsi qu'une réorientation dans l'espace de manière à être relocalisé en périphérie du champ de vision de l'utilisateur. Cette séquence se fera par le biais d'une animation graduelle, permettant à l'utilisateur

d'être conscient du changement. La distance menu/utilisateur demeurera la même (illustré par les lignes délimitant une sphère devant l'utilisateur) de manière à permettre de facilement pouvoir toucher le menu pour restaurer sa dimension et position initiale.

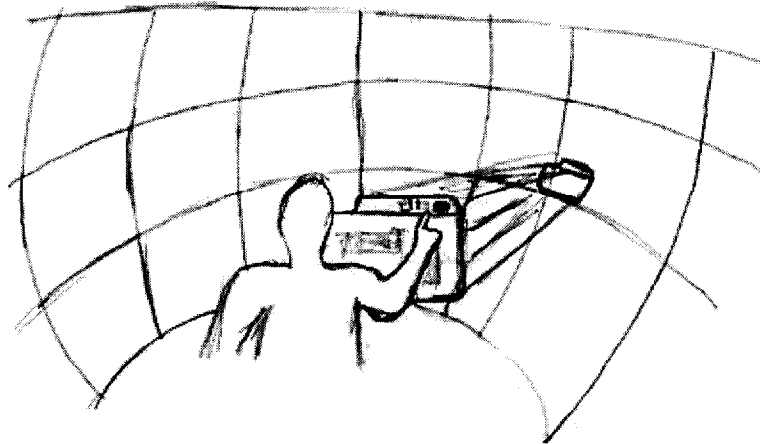


Figure 3.2 : Réduction d'un menu

Finalement, le bouton de redimensionnement permettra à l'utilisateur de changer la taille verticale et horizontale d'un menu de la même manière que ce que l'on retrouve dans les environnements WIMP 2D.

3.1.2 Caractéristiques des panneaux de dialogue

Ce qui suit est une liste des diverses caractéristiques ou propriétés définissant les fonctionnalités des panneaux de dialogue que nous avons identifiées. Les caractéristiques que nous avons retenues pour être utilisées lors de nos expériences sont marquées en gris dans le tableau 3.1. Pour certaines de ces caractéristiques sélectionnées, nous avons effectué des tests de performance alors que pour d'autres, nous avons utilisé un seul des états possibles afin de limiter la quantité de paramètres variables lors de nos expériences. Notre sélection des paramètres variables s'est basée sur la problématique que nous avons identifiée en début de cette thèse. Nous avons favorisé les caractéristiques pour lesquelles peu de résultats de recherche sont disponibles et pour lesquelles nous croyons qu'il est important d'augmenter les

connaissances scientifiques disponibles.

En fonction des résultats d'analyse, nous serons en mesure d'établir quelles sont les valeurs optimales pour chacune de ces caractéristiques afin de maximiser les performances d'interaction avec les panneaux de dialogue. Voici la liste de ces caractéristiques ainsi que les valeurs qu'elles peuvent prendre :

Tableau 3.1 : Caractéristiques des panneaux de dialogue et contrôles virtuels

Caractéristiques	Valeurs possibles	Notes
Menu – zone active		
Géométrie		
Dimension Ratio (facteur d'échelle) = dimensions / distance	• R = 0.26 (à l'échelle de la main) • R = 0.44 (à l'échelle de la tête) • R = 1.47 et + (à l'échelle d'un mur ou une pièce)	Dépend du matériel utilisé, de la résolution du HMD ou autre affichage et du dispositif de pointage. Distance de référence = 0.68 m (longueur approximative d'un bras)
Aspect	• choix de la couleur de fond • niveau de transparence	Relève du domaine des IHM standard. Nous utiliserons les recommandations en vigueur dans le domaine à ce niveau.
Repère	• Statique dans la scène • Statique par rapport à la position de l'utilisateur (3 degrés de liberté) • Statique par rapport au corps de l'utilisateur (4 à 6 degrés de liberté) • Statique par rapport à la tête de l'utilisateur	Aura probablement un impact sur la performance d'interaction avec les contrôles du menu.
Menu – bordure		
Géométrie		
Forme	• 2D (pas d'épaisseur visible) • 3D	Plus ou moins applicable. Tout menu pour SRV doit être 3D par définition. En même temps, le menu est généralement 2D dans la mesure où il a une forme plane, même si ce plan possède une épaisseur.
Aspect	• Fait uniquement de polygones non texturés • Polygones avec textures	Deux possibilités : texture ou représentation vectorielle. La représentation vectorielle offre une meilleure résolution et peut être changée d'échelle à volonté.
Sélection / manipulation		

**Tableau 3.1 : Caractéristiques des panneaux de dialogue et contrôles virtuels
(suite)**

Caractéristiques	Valeurs possibles	Notes
Contraintes de position	- Aucune - Limité aux extensions du champ de vision de l'utilisateur - Limité à une distance de bras à partir d'un point central défini par le corps de l'utilisateur - Déplacements non permis	Cette contrainte devrait être utilisée dans les cas où le panneau de dialogue utilise un repère relatif à la position du corps de l'utilisateur afin d'éviter de se retrouver dans une situation où il n'est plus possible de saisir un menu ayant été placé trop loin du corps ou hors du champ de vision par inadvertance..
Contraintes d'orientation	- Aucune - Perpendiculaire au champ de vision de l'utilisateur (métaphore du « champ de travail sphérique ») - Déplacements non permis	Une contrainte d'orientation permet une interaction plus facile avec les panneaux de dialogue en faisant en sorte que ceux-ci soient toujours orientés de manière optimale, où la normale au plan du menu est en direction de la tête de l'utilisateur.
Fermeture du menu	Bouton 'X' sur la bordure	Non implémenté
Minimisation du menu	Bouton « minimiser » sur la bordure	Non implémenté
Redimensionnement du menu	Icône statique dans le coin inférieur droit du menu	Non implémenté
Rétroaction visuelle		
Indication de la possibilité de sélection de la bordure de déplacement	- changement de couleur - changement d'apparence (géométrie) - Variation du niveau de transparence	Des données de performances humaines existent pour les IHM 2D. Nous chercherons à déterminer dans quelle mesure les performances humaines sont affectées dans le domaine des IHM 3D.
Indication de la sélection de la bordure de déplacement	- changement de couleur - changement d'apparence (géométrie) - Variation du niveau de transparence	Des données de performances humaines existent pour les IHM 2D. Nous chercherons à déterminer dans quelle mesure les performances humaines sont affectées dans le domaine des IHM 3D.
Ombre projetée sur la surface du menu	Ombre de la main	L'ombre n'a pas d'équivalence dans le domaine des IHM 2D. Il faut donc chercher à savoir quelle est sa valeur face aux performances pour des IHM 3D.
Contrôles		
Géométrie		
Forme	2D (pas d'épaisseur visible) 3D	Il existe déjà une étude à ce sujet même si celle-ci offre des résultats partagés. Il serait intéressant de faire une autre analyse en utilisant un crayon et stylo (angl. : Pen & Tablet) et des objets 3D comme contrôles et de voir la performance entre ceux-ci et

**Tableau 3.1 : Caractéristiques des panneaux de dialogue et contrôles virtuels
(suite et fin)**

Caractéristiques	Valeurs possibles	Notes
		des contrôles 2D standard.
Dimension Résolution angulaire (en arc minute)	• ~101 arc minutes (2cm à 0.68m) • ~202 arc minutes (4 cm à 0.68 m) • ~303 arc minutes (6 cm à 0.68 m) • ~404 arc minutes (8 cm à 0.68 m)	Dépend du matériel utilisé, de la résolution du HMD ou autre affichage et du dispositif de pointage. (1 arc min. = 1/60 de degré)
Aspect	• Fait uniquement de polygones non texturés • Polygones avec textures	Deux possibilités : texture ou représentation vectorielle. La représentation vectorielle offre une meilleure résolution et peut être changée d'échelle à volonté.
Sélection / manipulation		
Positionnement		Relève du domaine des IHM standard. Nous utiliserons les recommandations en vigueur dans le domaine à ce niveau.
Techniques du « système de visée »	• utilisé • non utilisé	Aide à évaluer la distance séparant le pointeur virtuel (le doigt de la main) avec la surface du panneau de dialogue et les contrôles.
Technique "Zoom interactif"	• utilisé • non utilisé	Cette aide visuelle s'avère utile dans les cas où la résolution du dispositif d'affichage RV est faible pour permettre par exemple l'utilisation de contrôles trop petits pour être manipulés directement sans aide.
Rétroaction visuelle		
Indication de la possibilité de sélection	• changement de couleur • changement d'apparence (géométrie) du menu ou de la bordure • Variation du niveau de transparence du menu ou de la bordure	Des données de performances humaines existent pour les IHM 2D. Nous chercherons à déterminer dans quelle mesure les performances humaines sont affectées dans le domaine des IHM 3D.
Indication de la sélection	• changement de couleur • changement d'apparence (géométrie) du menu ou de la bordure • Variation du niveau de transparence du menu ou de la bordure	Des données de performances humaines existent pour les IHM 2D. Nous chercherons à déterminer dans quelle mesure les performances humaines sont affectées dans le domaine des IHM 3D.

3.1.3 Description du panneau de dialogue utilisé dans nos expériences

Nous avons conçu un panneau de dialogue en considérant le facteur de l'échelle de celui-ci et en tenant compte de dimensions que nous jugeons adéquates afin de permettre une manipulation aisée. Nous devions aussi considérer la dimension dans le contexte d'une utilisation à l'intérieur d'un casque de visualisation dont la résolution est limitée à 800 x 600 éléments (pixels) par œil. Le casque de visualisation que nous avons utilisé est le i-Glasses 3D Pro de la compagnie VIO. Considérant les restrictions de résolution, nous avons déterminé par expérimentation qu'un menu ayant des dimensions de 30 cm (horizontal) par 20 cm (vertical) permettait une manipulation adéquate dans une plage de distance de regard compatible avec celle d'une longueur de bras (entre 30 cm et 70 cm). Les critères considérés étaient : 1) la lisibilité du texte apparaissant sur les menus, 2) la taille des éléments d'interface versus la taille de la main virtuelle et la précision de pointage avec celle-ci, et 3) le contraste des couleurs pour permettre la distinction des éléments d'interface.

Le système RV a été développé pour fonctionner à une échelle 1:1, c'est-à-dire que la scène virtuelle perçue à l'intérieur du casque de visualisation correspond à la vision qu'une personne aurait de la même scène si celle-ci était réelle. Ce faisant, nous avons calibré le système RV pour que la dimension des panneaux de dialogue virtuels soit également à une échelle 1:1. Lorsque le sujet déplace sa main le long d'un des côtés du menu, il parcourt effectivement une distance physique de 30 cm sur le côté horizontal du menu. Sa perception de la distance apparente de ce menu correspond à la distance qu'il doit parcourir avec le bras et la main afin d'atteindre la surface du menu.

Les panneaux de dialogue et autres éléments constituant l'IHM ont été conçus à l'intérieur d'un logiciel de modélisation 3D pour être ensuite exportés dans le format 3DStudio (extension de fichier 3DS).

Les couleurs des menus et des éléments d'interface ont été fixées à l'aide du logiciel de modélisation. Par ailleurs, la couleur de certains éléments d'interface dynamiques comme le curseur était modifiée par nos algorithmes présents dans le code de notre plateforme de simulation. Cela permet entre autres de changer la couleur du curseur selon la distance du doigt de la main versus le curseur par exemple.

Un autre paramètre visuel que nous contrôlons sur les menus est leur niveau de transparence. Cela permet de rendre un menu semi-transparent lorsque la main est en dehors de sa zone de proximité, et de le rendre opaque dans le cas contraire. En utilisant cette technique, le menu ne cache pas la scène derrière celui-ci lorsqu'il n'est pas utilisé.

3.2 Mesures de performance

3.2.1 Sujets

Nous avons eu recours à des sujets humains afin de tester les performances d'interaction et la satisfaction de l'utilisateur pour les panneaux de dialogue étudiés. Nous avons fait appel à 15 sujets pour chacune des deux premières expériences et à 14 sujets pour la troisième. Les sujets devaient répondre à certains critères que nous avons vérifiés en les soumettant à un court questionnaire lors de l'étape de sélection des sujets. Voici la liste de ces critères:

- Être droitier
- Percevoir les profondeurs (vision stéréoscopique)
- Percevoir l'ensemble des couleurs du spectre lumineux (c.-à-d., ne pas être daltonien).

Les sujets sélectionnés pour participer aux expériences devaient fournir les informations suivantes avant que les séances d'expériences aient lieu :

- L'âge
- Le genre
- Les expériences d'utilisation antérieure d'un SRV
- L'expérience générale en informatique.

3.2.2 Système utilisé

Du côté matériel, la plateforme est constituée d'un ordinateur Pentium 4 utilisant le système d'exploitation Microsoft Windows XP et doté d'une carte graphique GeForce 5500 de marque NVIDIA permettant une accélération du graphisme 3D. Cette carte possède deux sorties VGA indépendantes ce qui permet de simultanément raccorder un moniteur LCD et un casque de visualisation (HMD) à l'ordinateur. Cela nous permet de voir la scène telle que perçue par l'utilisateur portant le casque de visualisation durant l'expérience.

Nous avons également utilisé un système de suivi de position utilisant des ondes radioélectriques permettant de retracer trois points dans l'espace suivant six degrés de liberté. La marque de cet appareillage est le « Wintracker » de la compagnie VR-Space, Inc. Le volume d'opération utile de cet appareil est d'approximativement 1.5 mètre suivant chacun des trois axes X, Y et Z.

Le dernier élément matériel utilisé est le casque de visualisation « I-glasses PC/SVGA Pro 3D » de la compagnie i-O Display Systems. Ce casque offre une vision couleur et stéréoscopique de la scène et offre un champ de vision d'environ 25 degrés (diagonal).

Du côté logiciel, deux librairies du domaine public ont été utilisées dans le cadre de nos travaux. Nous avons utilisé la librairie « VRJuggler » développée par l'équipe du Dr. Carolina Cruz-Neira au Iowa State University's « Virtual Reality Applications Center ». Cette librairie prend en charge le rendu graphique bas niveau et l'interfaçage avec les dispositifs d'entrée/sortie du SRV de manière à rendre l'application RV indépendante du matériel RV utilisé. Cela permet de facilement migrer une application RV vers différentes plates-formes RV matérielles, sans avoir à modifier le code de l'application RV.

Nous avons également utilisé une autre librairie du domaine public, « OpenSceneGraph », qui permet l'utilisation d'un graphe de scène à l'intérieur de notre plateforme de test RV. L'utilisation d'un graphe de scène est essentielle afin de réaliser un SRV doté des éléments dynamiques dont nous avons besoin dans la réalisation de nos IHM pour SRV. Cette librairie nous a permis d'importer des modèles 3D réalisés à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D. Ceci offre l'avantage de permettre la réalisation de scènes virtuelles ayant un contenu plus important et réaliste ainsi que d'accélérer leur création. Les objets dynamiques tels les panneaux de dialogue et leurs composantes utilisent fortement la notion de relations parent/enfants, ce qui rend l'utilisation d'un arbre de scène indispensable. De cette manière, il est facile d'attacher des objets ensemble de sorte que ceux-ci partagent certaines propriétés physiques. Par exemple, les contrôles virtuels localisés sur un panneau de dialogue sont vus comme les enfants du menu (parent). Tout déplacement imposé au menu se transpose automatiquement à ses enfants qui y sont attachés.

Nous avons fait nos expériences sans avoir recours à un dispositif de pointage comme le « Wand » ou le gant RV. Le pointage a été effectué en utilisant uniquement la position de la main de l'utilisateur qui est obtenue par l'utilisation d'un des trois senseurs de position. Il est important de rappeler que notre objectif est de développer des IHM pour SRV qui sont indépendantes des composants matériels utilisés, dans la mesure du possible. Le panneau de dialogue développé dans le cadre de nos recherches est donc manipulable aussi bien avec un Wand qu'avec un gant RV. Par contre, nous devons préciser que cette indépendance du matériel comporte certaines limites. Nous considérons uniquement l'utilisation de nos IHM à l'intérieur d'un SRV immersif ou semi-immersif. Le SRV doit permettre l'utilisation de dispositifs d'entrée/sortie retournant des informations spatiales sur les trois axes x, y et z. Les SRV de type « RV de bureau », utilisant la souris et le clavier d'un PC, ne sont donc pas visés par nos IHM.

3.2.3 Caractérisation de la latence du SRV

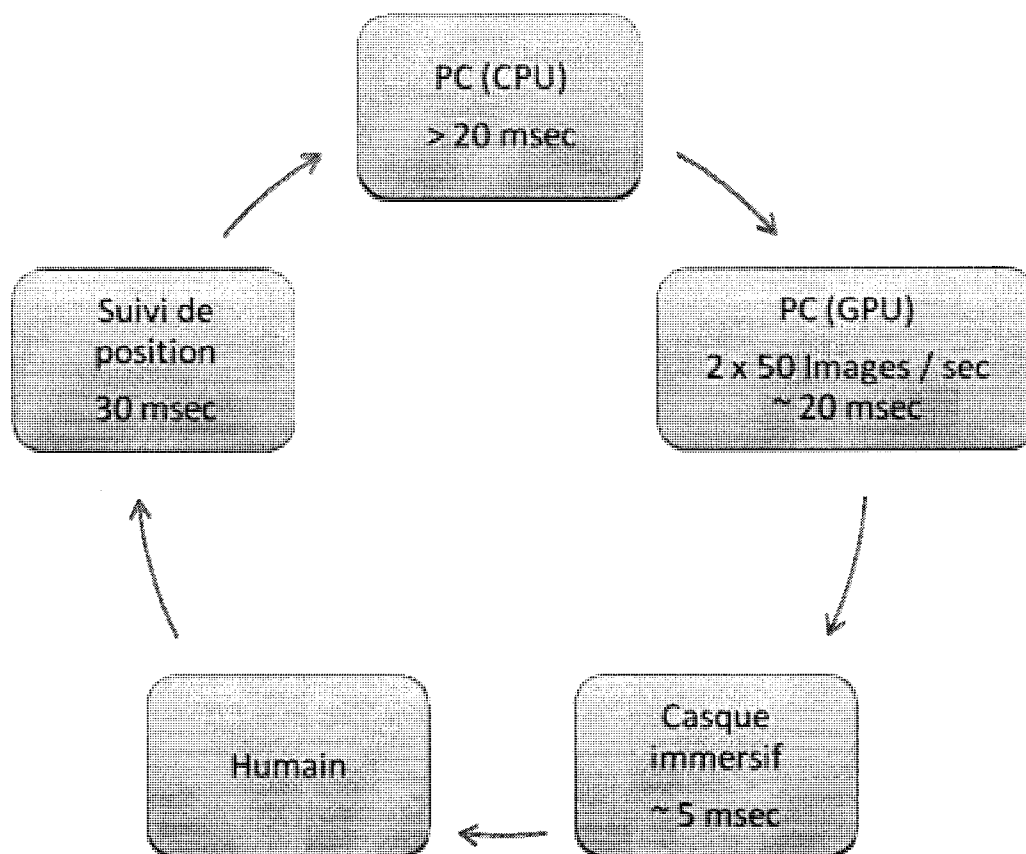


Figure 3.3 : Évaluation de la latence du SRV utilisé

Nous n'avons pas expérimentalement mesuré la latence. Les chiffres ci-dessous sont tirés des spécifications du fabricant et de nos propres estimations. On considère le taux de rafraîchissement vidéo comme étant 50 Hz et non pas 100 Hz car le pilote logiciel Nvidia générant la stéréoscopie calcule et affiche successivement les deux images (œil gauche / droit) en rafales lorsqu'une requête de rendu lui est acheminée. On a que $1/50 = 20 \text{ msec} / \text{image}$. Le système de suivi de position insère donc une latence supérieure à une image avec ses 30 msec de latence.

On peut donc tenter d'estimer la latence globale comme suit :

- Latence du système de suivi ~ 30 msec
- Latence du PC > 20 msec
- Latence GPU ~ 20 msec (1 image)
- Latence du casque < 5 msec
- Latence globale ~ 75 msec (3.75 images)

Nous estimons que la latence de notre système est inférieure à la limite de 100 msec généralement utilisée dans l'industrie comme niveau maximal de latence avant de voir l'apparition de symptômes sévères de mal du simulateur (angl. : motion sickness). Comme nous n'avons pas mesuré la latence de manière expérimentale, il s'agit ici d'une estimation de la latence réelle qui donne une idée sur les performances du SRV.

Dans nos expériences, cette latence n'a pas un impact marqué sur les manipulations à effectuer car les mouvements requis pour effectuer les tâches sont lents par rapport à la latence. On estime la vitesse de déplacement normale à environ 4 cm / seconde au niveau de la main de l'utilisateur. Donc si le sujet déplace sa main à un taux inférieur ou égal à 4 cm/sec, la position de la main virtuelle telle que vue dans le casque de visualisation sera, dans le pire des cas, 0.3 cm derrière la position actuelle de la main réelle du sujet.

Dans le même ordre d'idée, l'orientation et la position de la tête du sujet ne varient pratiquement pas durant les manipulations permettant d'effectuer la tâche demandée. La latence n'est donc pas un facteur d'inquiétude majeur à cet égard.

3.2.4 Plateforme de simulation RV configurable

Pour tester nos hypothèses, nous avons créé une plateforme SRV configurable et flexible. Cette plateforme est constituée de deux éléments de base : des équipements matériels précédemment décrits et un logiciel que nous avons développé.

Le logiciel que nous avons mis au point permet la mise en œuvre d'une simulation RV, tout en permettant de facilement remplacer la portion IHM de celle-ci. Nous avons utilisé des techniques de programmation modulaires et de programmation orientée objet (OOP) à cette fin.

La plateforme de test permet à l'utilisateur de se déplacer librement dans un environnement contenant divers objets dynamiques. Il peut interagir avec ces objets soit directement avec la main, soit indirectement en passant par des menus et des contrôles virtuels. Cette IHM est présentée à l'utilisateur pour lui permettre de faire des actions spécifiques sur ces objets ou d'agir sur d'autres paramètres de l'environnement dans lequel il se trouve.

La plateforme de test permet de mesurer divers paramètres de performance, qui seront définis dans les sections suivantes, en relation avec les interactions que l'utilisateur aura à effectuer. Les informations sont enregistrées dans un fichier durant l'expérience. À la fin d'une session d'immersion d'un sujet dans cet environnement, nous avons les données dont nous avons besoin pour effectuer nos analyses. De ces analyses, nous sommes en mesure de tirer des conclusions sur la performance et la satisfaction de l'utilisateur face à l'IHM à base de métaphores visuelles étudiées.

3.2.5 Prototypes d'IHM incorporant des caractéristiques d'IHM

Le code relatif aux prototypes d'IHM s'insère directement dans le code plus générique de la plateforme de simulation RV configurable décrite ci-haut. Nous avons fait en sorte que cette portion du code soit très modulaire, de manière à nous permettre de facilement activer une IHM parmi celles qui sont incluses dans la plateforme de simulation RV.

3.3 Sommaire de la méthodologie

3.3.1 Procédure expérimentale générale

Nous débuterons chaque séance d'expérience en présentant au sujet l'environnement SRV ainsi que chaque cas d'expérience auquel il sera confronté. Cette période sera d'une durée de 10 minutes. Il disposera par la suite d'une période de familiarisation de 5 minutes durant laquelle nous lui ferons exécuter une fois chaque cas d'expérience. Durant cette période, nous ne prendrons pas de mesures. Une fois la période de familiarisation terminée, nous suivrons le plan prévu pour chaque expérience dont la description suivra dans les prochains chapitres. À la fin de l'expérience, le sujet sera invité à répondre à un questionnaire sur son niveau de satisfaction de l'IHM qui nécessite environ 15 minutes. Ceci complétera la séance d'expérience.

Le temps d'expérimentation total pour chaque sujet varie entre une heure et une heure et demie selon l'expérience effectuée. Nous avons fait les expériences de façon à pouvoir répéter chaque plan d'expérience avec quatre sujets différents par jour. Les séances d'expérience se sont échelonnées sur une période de cinq jours par étude expérimentale.

Dans chacune de ces expériences, nous avons mesuré le temps d'exécution de la tâche et le degré d'erreur de manipulation, autrement dit, la précision des interactions se traduisant par l'écart de positionnement dans l'espace entre la position idéale pour effectuer l'action et la position réelle de l'action effectuée par l'utilisateur. Nous avons également évalué la satisfaction de l'utilisateur à l'aide des questions du questionnaire

proposé en fin d'expérience comme précédemment mentionné. Les données recueillies par l'entremise de ce questionnaire portent sur les variables suivantes :

- Satisfaction
 - Quelles techniques d'interaction le sujet a-t-il préférées?
 - Quelle valeur d'une caractéristique évaluée?
- Fatigue
 - Échelle de Likert à 5 niveaux
 - Nulle
 - Faible
 - Moyenne
 - Forte
 - Très élevée (causant des douleurs).
- Inconfort physiologique
 - Sensation de désorientation
 - Absente
 - Présente
 - Sensation de nausées
 - Absente
 - Présente
 - Maux de tête
 - Absent
 - Présent
- Autres remarques formulées par le sujet (champ du questionnaire « commentaires » en style libre)

Un facteur dont nous devons tenir compte est la fatigue physique et mentale des sujets. Nous avons donc considéré la durée de temps passé en immersion. La masse du bras du sujet ainsi que du périphérique de pointage, qui doivent être maintenus dans une position élevée durant une grande portion du temps total d'immersion, est un facteur de fatigue physique connu. De ce fait, plus le temps d'immersion est long, plus les temps mesurés pour chaque essai risquent d'afficher une tendance à la hausse. Une conséquence possible est que nos mesures auraient pu être entachées d'une déviation non linéaire qui risque de fausser nos conclusions. De ce fait, nous avons demandé aux sujets d'effectuer une pause de quelques secondes entre chaque essai ainsi qu'une pause de 30 secondes à 1 minute entre chaque bloc d'essais.

Le tableau 3.2 donne des statistiques d'ordre général telles que le nombre de variables indépendantes utilisées, le nombre de valeurs possibles pour chacune d'elles ainsi que le nombre de cas considérés pour les trois plans expérimentaux prévus. Nous donnerons les détails de chaque plan expérimental dans les chapitres subséquents.

Tableau 3.2 : Sommaire des trois plans expérimentaux

Étude expérimentale	Nombre de variables indépendantes	Nombre de cas	Répétitions pour chaque cas	Nombre total d'essais par sujet	Durée approximative par sujet (minutes)	Nombre de sujets
#1 Le repère des panneaux de dialogue	3	5	30	150	45	15
#2 Les rétroactions visuelles	4	8	20	160	45	15
#3 La calculatrice - tâche longue et requérant une plus forte concentration	4	8	15	120	75	14

CHAPITRE 4 - MANIPULATION DES PANNEAUX DE DIALOGUE À L'INTÉRIEUR D'UN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

Expérience 1 – Étude expérimentale de l'impact sur la performance humaine de différents repères des panneaux de dialogue dans un environnement virtuel

4.1 Introduction

La première expérience que nous avons réalisée porte sur l'impact qu'ont différents repères des panneaux de dialogue sur les performances de l'utilisateur du SRV. Nous voulions déterminer quels repères offrent les meilleures performances, et dans quelles circonstances par rapport à la position et à l'orientation de l'utilisateur dans l'espace. Les conclusions tirées de ces résultats visent à nous permettre de formuler des recommandations quant aux repères à utiliser lors de la conception d'interfaces RV. Cette section a fait l'objet d'une publication (Bernatchez et Robert 2007).

4.1.1 Les cinq repères

Nous avons considéré cinq repères différents pour définir le positionnement dynamique d'un panneau de dialogue par rapport au corps de l'utilisateur. Afin d'établir quels repères utiliser dans notre expérience, nous avons considéré le lien entre le référentiel (la position et l'orientation dans l'espace) de l'utilisateur et celui du panneau de dialogue. Une manière pratique d'évaluer ces liens est de considérer le nombre de degrés de liberté qui sont partagés ou communs aux deux référentiels. Par exemple, si le panneau de dialogue se déplace (en position mais pas en orientation) selon les mouvements de l'utilisateur, alors nous dirons que ces deux repères partagent trois degrés de liberté. Les changements de position ou d'orientation qui sont transmis d'un repère vers l'autre sont dits communs ou partagés. Le choix des cinq repères retenus a également été influencé par des considérations d'ordre pratique. Ainsi, nous avons considéré des repères qui

représentent des cas d'applications utiles et réels. Par exemple, nous aurions pu considérer des repères où seulement un ou deux degrés de liberté étaient communs. Cela aurait pu prendre la forme d'un menu fixe par rapport à la scène selon deux axes, rattaché à la tête de l'utilisateur. L'utilité de tels cas est marginale dans un contexte d'utilisation réelle car il est inutile que le panneau de dialogue suive les mouvements verticaux de la tête de l'utilisateur si celui-ci est loin du menu, et ne peut donc bien le voir ou s'en servir. Nous avons exclu ces cas de repères de notre étude. Notre choix final de cinq repères a été fait de manière à obtenir une gradation du nombre de degrés de liberté tel qu'indiqué au tableau 4.1. Ceci nous permet une évaluation méthodique et systématique des repères en fonction du nombre de degrés de liberté partagés.

Le tableau 4.1 présente un sommaire des caractéristiques de chaque repère de même que le nombre de degrés de liberté qui leurs sont rattachés. Une description textuelle est également donnée afin d'explicitement indiquer la nature de chaque repère. Nous avons ordonné les repères en ordre croissant suivant le nombre de degrés de liberté relatif à la position et l'orientation du corps de l'utilisateur. De cette manière, il est plus facile de voir s'il existe une relation entre le nombre de degrés de liberté utilisés par un repère et les performances observées chez l'utilisateur. Nous avons donc choisi ces repères suivant un ensemble de cas couvrant les deux extrêmes des cas en ce qui a trait à la relation pouvant exister entre le référentiel de l'utilisateur et celui des interfaces qu'il doit manipuler dans l'environnement RV.

Tableau 4.1 : Les cinq repères

Repère	Caractéristiques des repères appliqués au panneau de dialogue	Nombre de degrés de liberté relatifs au corps de l'utilisateur
1	fixe par rapport à la scène	0
2	fixe par rapport à la position du corps ¹ de l'utilisateur	3
3	fixe par rapport à la position (3 degrés de liberté) et l'axe de direction du regard (1 degré de liberté) du corps de l'utilisateur	4
4	fixe par rapport à la main gauche (non dominante) de l'utilisateur	6
5	fixe par rapport à la tête (le regard) de l'utilisateur	6

4.2 Méthodologie

Dans cette section, nous allons décrire la plateforme de test RV que nous avons développée, la tâche devant être effectuée, les sujets humains ainsi que la procédure utilisée.

4.2.1 La plateforme de test

Pour être en mesure d'évaluer les performances de l'utilisateur en fonction du repère des panneaux de dialogue, nous avons conçu et développé une plateforme de test RV qui

¹Dû à des limitations techniques, nous avons considéré la position de la tête de l'utilisateur comme étant équivalente à la position du corps de celui-ci comme approximation raisonnable. Nous assumons ici que l'utilisateur est en tout temps en position vertical, c.-à-d. que la position sur un plan horizontal de la taille et de la tête restent similaires, la différence de position verticale étant connue et constante.

incorpore plusieurs configurations différentes de panneaux de dialogue, dans un environnement virtuel recréant une situation concrète d'utilisation. Nous avons choisi de placer les utilisateurs dans un environnement recréant une cuisine à l'intérieur d'une maison. D'un point de vue pratique, nous avons utilisé cet environnement parce que celui-ci avait été précédemment développé par l'auteur de cette thèse aux fins d'un projet d'étude et était disponible. Nous voulions placer l'utilisateur dans un contexte connu et plausible, permettant de recréer le type d'environnement pouvant être rencontré lors d'une utilisation typique de ce type de panneaux de dialogue dans une application RV concrète. Cet environnement convenait parfaitement à cette fin. La figure 4.1 montre cet environnement.



Figure 4.1 : Environnement virtuel utilisé dans le cadre de nos trois expériences

Nous voulions utiliser un environnement virtuel qui permet d'évaluer les performances tout en plaçant l'utilisateur dans un contexte où il pourrait rencontrer des conditions d'occlusion causées par les objets environnants de la scène. Ce type d'environnement se rapproche davantage des cas d'utilisations réels mentionnés plus haut.

La plateforme de test RV est constituée de deux panneaux de dialogue. Un premier menu, statique par rapport à la scène, permet aux sujets de contrôler le démarrage de chaque essai de l'expérience et d'obtenir des informations sur l'expérience en cours. Le menu de contrôle affiche des informations sur le bloc et le numéro de l'essai en cours. Deux boutons sur ce menu permettent au sujet de contrôler le moment de démarrage de chaque essai. La figure 4.2 donne un aperçu du menu de contrôle.

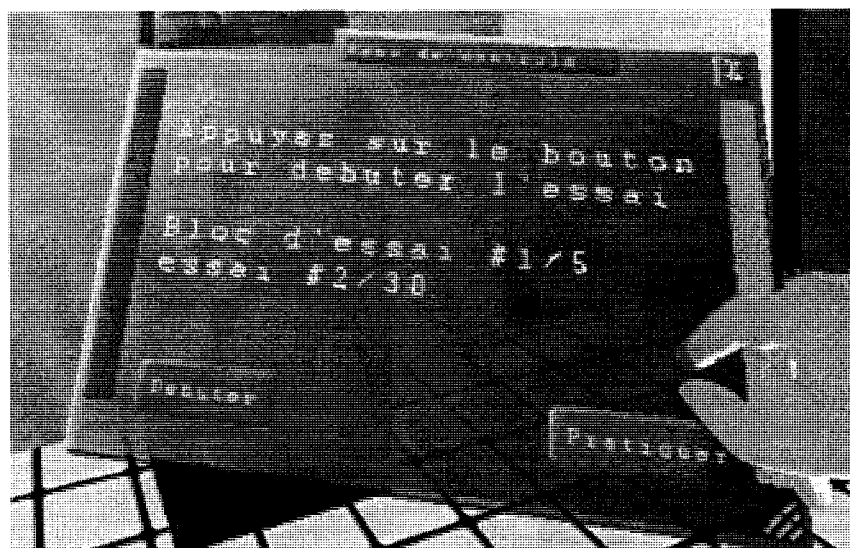


Figure 4.2 : Menu de contrôle de la plateforme de test RV

Le second panneau de dialogue contient les éléments d'interfaces avec lesquels nous avons mesuré les performances des sujets. Ce menu comporte un gradateur linéaire avec un curseur pouvant coulisser sur celui-ci, suivant l'axe le plus long du gradateur. La longueur du gradateur sur l'axe de coulissement est de 15,6 cm par 3,3 cm en hauteur. Le curseur mesure 1,2 par 1,9 cm. Une flèche de couleur verte est fixée au dessus du

gradateur de manière à indiquer la position cible de relâchement du curseur. Les dimensions de la flèche sont de 5,3 en largeur par 5,5 cm en hauteur. L'épaisseur de ces éléments d'interface est de 1cm. Le menu lui-même mesure 30 cm de large par 20 cm de haut par 1 cm d'épaisseur. Ces dimensions sont à l'échelle ce qui implique que les dimensions perçues par l'utilisateur du système RV étaient telles qu'indiquées ci-haut. Par exemple, lorsque l'utilisateur effectuait un mouvement horizontal, partant de l'extrémité gauche allant à l'extrémité droite du menu, sa main effectuait un mouvement physique réel de 30 cm, tel que perçu dans le casque de visualisation. La figure 4.3 illustre le menu avec ses composantes telles que décrites.

4.2.2 La tâche

Dans cette expérience, nous demandions au sujet de déplacer un curseur sur un gradateur linéaire de sa position de départ vers une position d'arrivée marquée par une flèche verte sur l'interface du panneau de dialogue. La position de départ du curseur était toujours la même, soit à l'extrémité gauche du gradateur. La position de la flèche était également fixe sur le panneau de dialogue, tout au long de l'expérience. La distance à parcourir était donc elle aussi constante d'un essai à un autre. La figure 4.3 illustre la manipulation à effectuer.

Nous demandions au sujet d'effectuer le mouvement le plus rapidement possible, tout en relâchant le curseur le plus précisément possible de manière à ce que le centre du curseur soit aligné avec le centre de la flèche. Le curseur était remis à son point de départ à l'extrême gauche de la barre de déplacement au début de chaque nouvel essai. Le sujet n'avait pas de limite de temps imposée pour effectuer la manipulation. La fin d'un essai était déterminée par la position du curseur lors de son relâchement. C'est-à-dire que le chronométrage de l'essai prenait fin seulement lorsque le curseur était relâché à l'intérieur d'une zone prédéterminée définissant une région de tolérance autour du point de relâchement (la cible) indiqué par la flèche. Cette région couvrait 8% du déplacement maximal du curseur, de part et d'autre de la position centrale indiquée par la flèche. En

d'autres termes, la plage de déplacement totale du curseur étant de 12.8 cm horizontalement, la plage de déviation tolérée autour du centre de la flèche est de 1.08 cm, de part et d'autre de ce point. Comme nos menus sont représentés suivant une échelle 1:1, il s'en suit que le sujet pouvait relâcher le curseur dans une plage couvrant 2.16 cm centré suivant la flèche verte comme le démontre la figure 4.3.

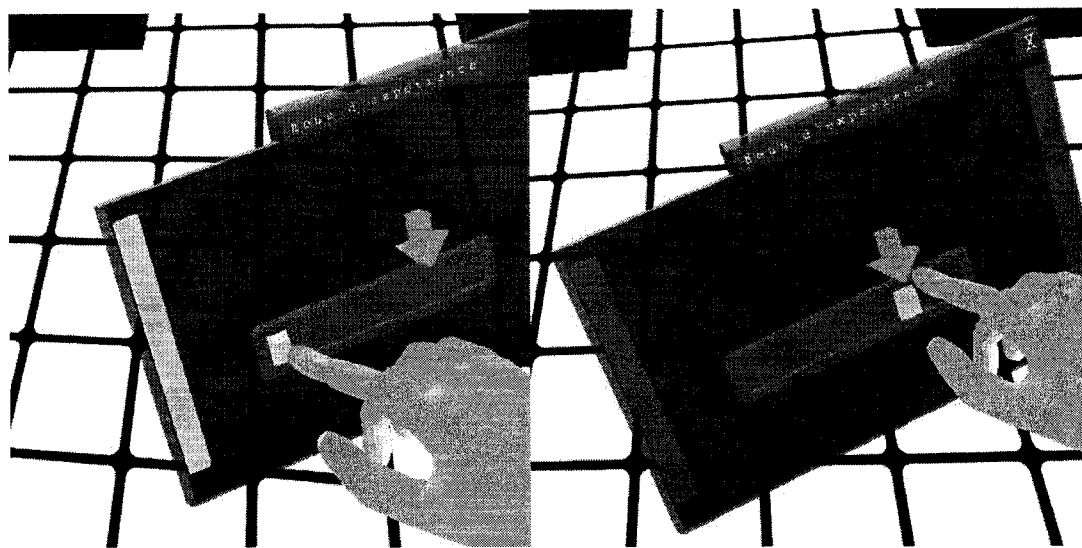


Figure 4.3 : Tâche de l'expérience 1

Notre objectif était de permettre une zone de relâchement aussi étroite que possible de manière à contraindre les sujets à effectuer un mouvement équivalent en distance et en temps. Cette zone fut déterminée de manière à être la plus étroite tout en respectant les limites imposées par le système de suivi de position en termes de précision et de bruit de lecture. Nous ne voulions pas par exemple qu'un sujet puisse obtenir un temps chronométré plus court en relâchant hâtivement le curseur et étant ainsi moins précis dans son mouvement qu'un autre sujet essayant de s'appliquer davantage à bien faire la tâche. En imposant cette « zone » de relâchement, nous voulions nous assurer qu'il serait difficile de tricher en quelque sorte. Des tests préliminaires ont montré que la zone prescrite était adéquate à cette fin et offrait un bon compromis entre précision et vitesse de manipulation. La zone de relâchement est suffisamment large pour permettre d'effectuer la tâche dans des délais raisonnables (moyenne de temps par essai inférieur à

10 secondes) tout en considérant les contraintes imposées par l'équipement de mesure RV utilisé (bruit de lecture et précision de pointage) de même que la dextérité des sujets. Finalement, il est à noter que les sujets n'étaient pas au courant des dimensions physiques de cette zone de relâchement. Ils n'étaient avisés que de l'existence de celle-ci.

4.2.3 Les sujets

Quinze sujets, soit 11 hommes et 4 femmes, ont participé à l'expérience. L'âge moyen était de 27 ans, couvrant une plage allant de 18 à 60 ans. Les sujets devaient minimalement avoir 18 ans, être droitiers et en mesure de percevoir correctement les couleurs. Le prérequis exigeant d'être droitier était imposé en premier lieu pour des considérations d'ordre technique. Nos menus ont effectivement été conçus pour une utilisation par des droitiers. Pour les besoins de nos tests, nous n'étions pas intéressés par les différences entre des sujets droitiers et gauchers. L'inclusion de ceux-ci dans les tests aurait demandé une adaptation de l'ensemble de notre plateforme de test afin de pouvoir gérer ce cas. Le second prérequis concernant la vision correcte des couleurs vient essentiellement du fait que l'environnement virtuel utilise des changements de couleur de certains éléments d'interface dans le cadre de nos tests. Il est donc nécessaire pour un individu de bien percevoir ces nuances de couleurs afin de pouvoir effectuer les divers tests demandés. Nous faisons une vérification en début d'expérience avec le sujet à l'aide du casque de visualisation qui présentait des éléments d'interfaces ayant des couleurs différentes.

Les sujets n'avaient pas ou très peu d'expériences antérieures dans l'utilisation de systèmes de réalité virtuelle. Les sujets ayant répondu à notre appel à la participation ont été convoqués à tour de rôle sur une période d'une semaine, au rythme d'un sujet à l'heure. Un seul sujet était présent à la fois dans notre laboratoire d'expérimentation.

Les sujets ont été payés au taux de 10\$ par heure. Comme il s'agissait de la première

expérience pour tous les sujets, nous leur présentions un formulaire de consentement qu'ils étaient invités à lire et à signer avant de commencer l'expérience. Le formulaire de consentement est donné à l'annexe 1.

4.2.4 Procédure

Au début de la séance d'expérience, chaque sujet devait compléter un court questionnaire au sujet de son âge, son genre et ses expériences antérieures avec les systèmes informatiques en général ainsi que les systèmes RV. Les détails de ce questionnaire sont donnés à l'annexe 2. Par la suite, une brève présentation de la plateforme de tests RV était faite en deux étapes.

En premier lieu, l'auteur de cette thèse plaçait le matériel RV sur lui et présentait au sujet le fonctionnement général de l'environnement RV. Il donnait des recommandations sur la façon d'effectuer les manipulations avec l'interface présentée. On expliquait au sujet comment bouger la main à proximité des panneaux de dialogue et comment effectuer l'approche finale vers les contrôles avec sa main, en passant devant du menu. Par exemple, nous mentionnions au sujet de garder le bras allongé le long du corps après avoir appuyé sur le bouton « démarrer » et d'attendre que l'autre panneau de dialogue apparaisse. Nous lui demandions par la suite de faire une approche avec sa main droite (le pointeur) de manière à passer systématiquement devant le panneau de dialogue. Cela permettait d'assurer une constance dans les mouvements effectués juste avant que le chronométrage de l'expérience ne démarre. La durée de cette introduction était d'environ cinq minutes.

Pour cette expérience, nous demandions au sujet de rester debout. Cette posture permettait un meilleur contrôle de la position du bras le long du corps et une plus grande mobilité du haut du corps. Nous voulions favoriser les fluctuations de position du haut du corps de l'utilisateur pouvaient influencer les performances humaines face aux IHM utilisées. Plus spécifiquement, lors des manipulations effectuées sur un panneau de

dialogue statique par rapport à la scène, les variations de positions entre les deux repères sont maximales. En demandant au sujet de rester debout, nous plaçons volontairement ce dernier dans la situation pouvant occasionner les plus fortes variations relatives de positions et d'orientations. Cela permet en quelque sorte d'évaluer la performance dans la pire condition.

En second lieu, le sujet prenait place à son tour afin que l'équipement RV soit installé sur lui pour pouvoir pratiquer chaque manipulation de l'expérience durant une période de cinq minutes. Nous avons déterminé, par des essais préliminaires que nous avons nous-mêmes effectués avec le SRV, la durée du temps d'entraînement de manière à permettre à chaque sujet d'acquérir un confort et une aisance minimale avec la manipulation des interfaces. Aucune mesure n'était prise durant la période de pratique.

Une fois la période de pratique terminée, le sujet prenait une courte pause durant laquelle nous l'informions du fait que les essais subséquents seraient mesurés. La durée de l'expérience fut de 45 minutes en moyenne, sans considérer les périodes d'introduction et de pratique. Les essais effectués par chaque sujet étaient regroupés en cinq blocs de 30 essais chacun, pour un total de 150 essais. Chacun de ces cinq blocs représentait un des cinq repères différents qui étaient évalués dans cette expérience. À la fin de chaque bloc d'essai, nous demandions au sujet de donner ses impressions. Nous lui demandions de comparer qualitativement le cas présent avec celui du bloc précédent et de nous indiquer ses préférences. Toute autre remarque était notée et consignée au registre à la main par le responsable de l'expérience.

Une fois les 150 mesures effectuées, le sujet enlevait l'équipement RV et complétait un court questionnaire dont les détails sont donnés à l'annexe 2. Ce questionnaire permettait d'évaluer la satisfaction de l'utilisateur. Les données recueillies par l'entremise de ce questionnaire portent sur les sujets suivants :

- Satisfaction
 - Quels repères le sujet a-t-il préférés?
- Fatigue
 - Échelle de Likert à 5 niveaux
 - Nulle (imperceptible)
 - Faible (au seuil de la perception)
 - Moyenne (équivalente à une activité de durée similaire)
 - Forte (difficultés de concentration)
 - Très élevée (causant des douleurs).
- Inconfort physiologique
 - Sensation de désorientation (absente / présente)
 - Sensation de nausées (absente / présente)
 - Maux de tête (absents / présents)
 - Troubles de la vue (absents / présents)
- Autres remarques formulées par le sujet (champ du questionnaire « commentaires » en style libre)

L'expérience a été conçue de manière à limiter la fatigue des sujets. Pour ce faire, l'interface de la plateforme RV permettait au sujet de choisir lui-même à quel moment chaque essai débutait en requérant de celui-ci qu'il appuie sur un bouton du panneau de dialogue de contrôle de l'expérience. Le sujet pouvait donc effectuer une courte pause entre chaque bloc d'essais. Par ailleurs, les mesures prises ont permis de tracer des courbes d'apprentissage qui peuvent être utilisées afin de déceler l'apparition de fatigue chez le sujet.

4.2.5 Variables de l'expérience

Tableau 4.2 : Variables de l'expérience 1

Indépendante	Dépendante
1) repère (P)	1) temps d'essai
2) genre du sujet (S)	2) temps de sélection
3) bruit de lecture (S)	3) temps de déplacement
	4) erreur de positionnement

La principale variable indépendante mesurée (indiqué par un P dans le tableau 4.2) est le repère. Le genre du sujet et le bruit de lecture ont été considérés comme des variables indépendantes secondaires (indiqué par un S dans le tableau 4.2), c.-à-d., des variables n'étant pas de l'intérêt principal de l'expérience dont l'existence est connue et qui doivent être pris en compte étant donné l'impact qu'ils peuvent avoir sur les résultats.

Les variables dépendantes qui ont été mesurées par la plateforme RV sont le temps d'essai, qui inclut le temps de déplacement et l'erreur de positionnement. Elles sont comptabilisées et sauvegardées dans un fichier informatique à la fin de chaque essai.

Le temps d'essai comprend l'intervalle de temps débutant au moment où la main de l'utilisateur entre dans la zone active du panneau de dialogue jusqu'au moment où le curseur est relâché. Cette zone forme un volume cubique invisible autour du menu. La figure 4.4 illustre la zone active du menu qui a été rendue visible en semi-transparence pour les besoins de la démonstration.

Ce volume était de dimensions fixes d'un essai à l'autre, permettant de s'assurer que pour chaque essai, les temps mesurés étaient effectués sur une même base de référence et indépendants de la distance initiale entre le sujet et le menu. Le volume avait les dimensions suivantes : 30 cm (largeur) x 20 cm (hauteur) x 7,5 cm (profondeur). La base de ce volume repose sur le plan de la surface du panneau de dialogue et s'étend 7,5 cm devant celui-ci. Comme la distance à parcourir n'est que de 7,5 cm avant d'atteindre le

curseur, nous éliminions ainsi tout temps relatif au parcours de la main avant d'arriver à proximité du menu. La position initiale de la main de l'utilisateur dans l'espace n'avait donc pas d'incidence sur les temps mesurés. La distance entre le menu et l'utilisateur n'avait également donc pas d'incidence sur les mesures.

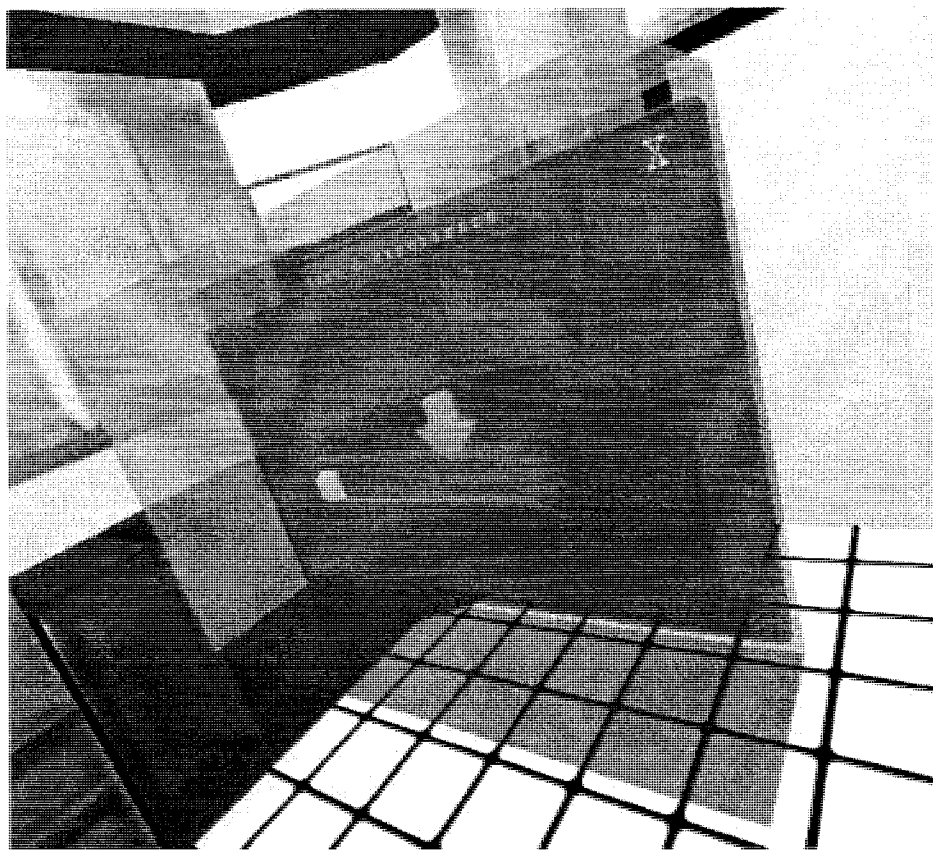


Figure 4.4 : Zone active du menu

Le temps de déplacement comprend l'intervalle de temps partant du moment où l'utilisateur touche le curseur jusqu'au moment où celui-ci est relâché. En d'autres termes, c'est le temps requis pour placer le curseur en position vis-à-vis la cible et relâcher le curseur. Un algorithme rapide de détection de collision permettait de détecter cette condition.

L'erreur de positionnement est obtenue en calculant la différence entre la position de la flèche verte marquant la position de relâchement demandée et la position où le curseur est réellement relâché. On considère que le curseur est relâché lorsque le doigt du sujet sort du volume de collision du curseur. Les dimensions de ce volume de collision sont de 2 cm de part et d'autre du centre du curseur, suivant chacun des trois axes X, Y et Z.

Une autre variable dépendante peut être déduite à partir de celles mesurées durant l'expérience. Il s'agit du temps requis pour toucher le curseur avant de le faire glisser que nous nommerons le « temps de sélection ». On obtient :

$$\text{Temps de sélection} = \text{Temps d'essai} - \text{Temps de manipulation} \quad (\text{Eq. 1})$$

Pour chacune de ces variables, nous cherchons à obtenir les valeurs de temps et d'écarts de positions les plus faibles, définissant les meilleures performances possible, c.-à-d. : 1) la plus grande rapidité et 2) la plus grande précision possible.

4.2.6 Le protocole expérimental

Le tableau 4.3 présente un sommaire des paramètres de l'expérience tels que le nombre de variables indépendantes utilisées, le nombre de valeurs possibles pour chacune d'elles ainsi que le nombre de cas considérés pour le plan expérimental utilisé.

Tableau 4.3 : Sommaire du plan expérimental de l'expérience 1

Étude expérimentale	Nombre de variables indépendantes primaires	Nombre de variables indépendantes secondaires	Nombre de cas	Répétitions pour chaque cas	Nombre total d'essais par sujet	Durée approximative par sujet (minutes)	Nombre de sujets
Repère des panneaux de dialogue	1	2	5	30	150	45	15

L'ordre d'apparition des cinq repères présentés aux sujets a été randomisé de manière à contrebalancer les effets d'apprentissage. L'ordre des cas utilisé est donné au tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Ordre des cas pour l'expérience 1

Sujet	Ordre des cas				
1	1	2	3	4	5
2	1	3	4	5	2
3	1	4	2	3	5
4	2	3	4	5	1
5	2	4	5	1	3
6	2	1	5	3	4
7	3	4	5	1	2
8	3	5	2	1	4
9	3	5	2	4	1
10	4	5	1	2	3
11	4	1	3	2	5
12	4	2	1	5	3
13	5	2	4	3	1
14	5	1	3	2	4
15	5	3	1	4	2

4.3 Résultats

4.3.1 Données empiriques mesurées et statistiques descriptives

Les tableaux suivants donnent les résultats obtenus pour chaque variable indépendante mesurée. On y liste les valeurs moyennes, les erreurs standards ainsi que les écarts-types de déviation à plus ou moins 5%. Les résultats ont été triés par ordre croissant suivant la colonne des moyennes afin de mettre en évidence l'ordre optimal des cas présentés en terme de performances. Le nombre N indique le nombre de données (mesures) utilisées pour chaque cas.

La première variable indépendante considérée est le repère utilisé. Les quatre tableaux suivants donnent les résultats.

Tableau 4.5 : Temps d'essais total moyen pour chaque repère (secondes)

Repère	TEssai (moyenne)	TEssai Erreur std.	TEssai -95%	TEssai +95%	N
3	5,26	0,37	4,51	6,00	15
5	5,28	0,37	4,54	6,02	15
1	5,70	0,37	4,96	6,44	15
2	5,71	0,37	4,97	6,45	15
4	6,08	0,37	5,34	6,82	15

Tableau 4.6 : Temps de sélection moyen pour chaque repère (secondes)

Repère	TSelec (moyenne)	TSelec Erreur std.	TSelec -95%	TSelec +95%	N
3	1,28	0,12	1,05	1,52	15
5	1,30	0,12	1,07	1,54	15
4	1,32	0,12	1,09	1,56	15
1	1,60	0,12	1,36	1,83	15
2	1,69	0,12	1,45	1,92	15

Tableau 4.7 : Temps de déplacement moyen pour chaque repère (secondes)

Repère	TDepla (moyenne)	TDepla Erreur std.	TDepla -95%	TDepla +95%	N
3	3,97	0,33	3,31	4,64	15
5	3,98	0,33	3,31	4,64	15
2	4,02	0,33	3,36	4,69	15
1	4,10	0,33	3,44	4,77	15
4	4,75	0,33	4,09	5,42	15

On remarque que les repères 3 et 5 ont donné les performances les plus élevées. Les trois autres se sont classés à des positions différentes selon la variable dépendante évaluée. Par contre, on note que le repère 4 se retrouve deux fois en dernière position. Cela indique qu'il est le pire des cinq repères du point de vue des performances humaines mesurées chez les utilisateurs. La figure 4.5 donne une représentation graphique de ces résultats.

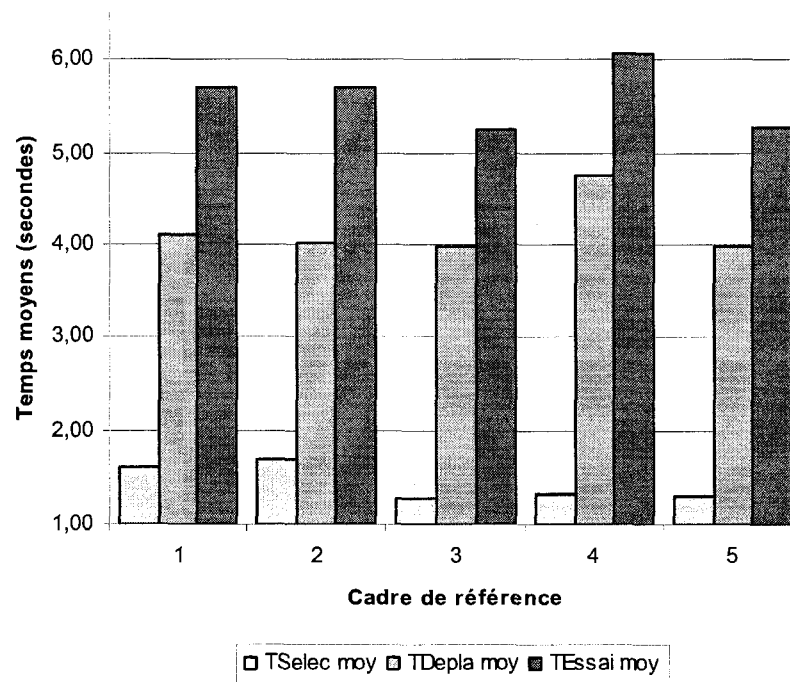


Figure 4.5 : Temps d'essai total moyen pour chaque repère

En termes de variations relatives de performances d'un repère à l'autre, on observe une différence de 13,5% entre les repères 3 et 4, le meilleur et le pire cas respectivement. À partir de ces chiffres, un utilisateur peut sauver jusqu'à 8 minutes sur une période de 60 minutes passées en immersion, lui permettant d'accomplir la tâche en 52 minutes.

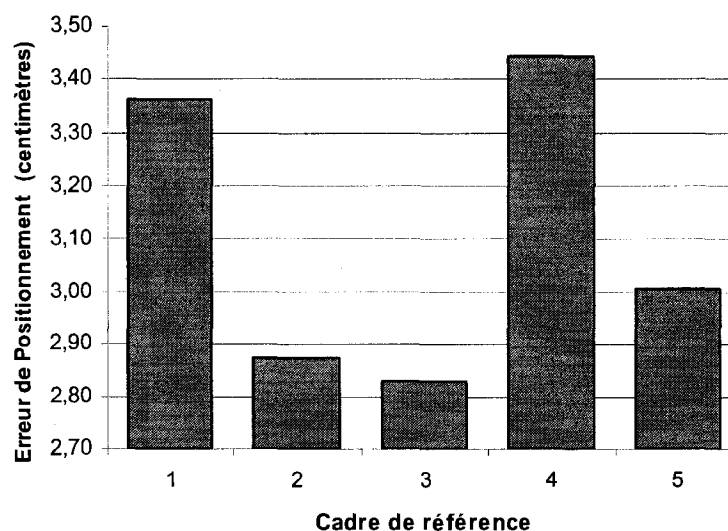
Du côté de l'erreur de positionnement, on obtient des résultats similaires qui sont donnés au tableau 4.8.

Tableau 4.8 : Erreur de positionnement moyenne pour chaque repère (centimètres)

Repère	EPos (moyenne)	EPos Erreur std.	EPos -95%	EPos +95%	N
3	2,83	0,26	2,32	3,34	15
2	2,88	0,26	2,36	3,39	15
5	3,01	0,26	2,50	3,52	15
1	3,36	0,26	2,85	3,88	15
4	3,44	0,27	2,93	3,95	15

Dans tous les résultats précédents, le repère 3 ressort comme le plus performant. De même, le repère 4 est toujours le moins performant, sauf dans le cas du temps de sélection moyen.

La Figure 4.6 illustre ces données.

**Figure 4.6 : Erreur de positionnement moyenne pour chaque repère**

La deuxième variable indépendante considérée est le genre des sujets. Étant donné le faible nombre de sujets féminins, les résultats de cette section sont donnés à titre indicatif seulement et ne servent qu'à nuancer des possibles différences qui pourraient exister au niveau du genre. D'autres études seraient nécessaires pour établir avec certitude s'il y a un effet significatif relié au genre. Les trois tableaux suivants donnent

les résultats observés.

Tableau 4.9 : Temps d'essais total moyen pour chaque genre (secondes)

genre	TEssai Moyenne	TEssai Erreur std.	TEssai -95%	TEssai +95%	N
M	5,00	0,19	4,61	5,38	55
F	6,21	0,28	5,65	6,78	20

Tableau 4.10 : Temps de sélection moyen pour chaque genre (secondes)

genre	TSelec Moyenne	TSelec Erreur std.	TSelec -95%	TSelec +95%	N
M	1,27	0,06	1,14	1,40	55
F	1,60	0,10	1,41	1,80	20

Tableau 4.11 : Temps de déplacement moyen pour chaque genre (secondes)

genre	TDepla Moyenne	TDepla Erreur std.	TDepla -95%	TDepla +95%	N
M	3,72	0,17	3,39	4,06	55
F	4,61	0,25	4,12	5,10	20

Dans le cas de la variable indépendante représentant le genre du sujet, on note une concordance des résultats de performance pour les variables dépendantes relatives au temps. Les hommes sont en moyenne plus rapides que les femmes. La figure 4.7 donne une représentation graphique de la situation.

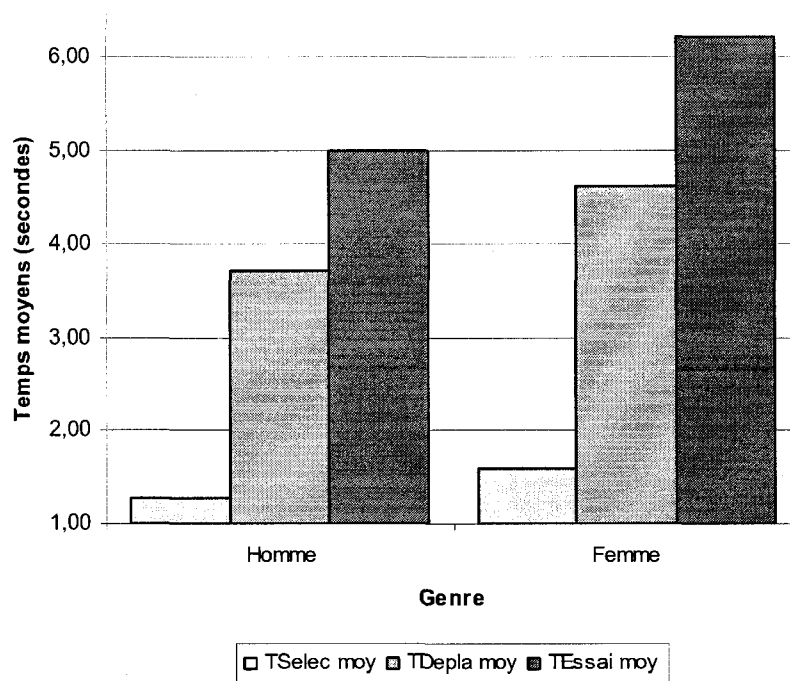


Figure 4.7 : Temps d'essai total moyen pour chaque genre

Si on regarde l'erreur de positionnement, on voit que les femmes sont plus performantes que les hommes cette fois-ci. La précision de manipulation est plus grande chez celles-ci. Il semble donc y avoir un effet balancier entre le temps de manipulation et la précision en fonction du genre.

Tableau 4.12 : Erreur de positionnement moyenne pour chaque genre (centimètres)

Genre	EPos Moyenne	EPos Erreur std.	EPos -95%	EPos +95%	N
F	2,97	0,19	2,59	3,36	20
M	3,24	0,13	2,98	3,50	55

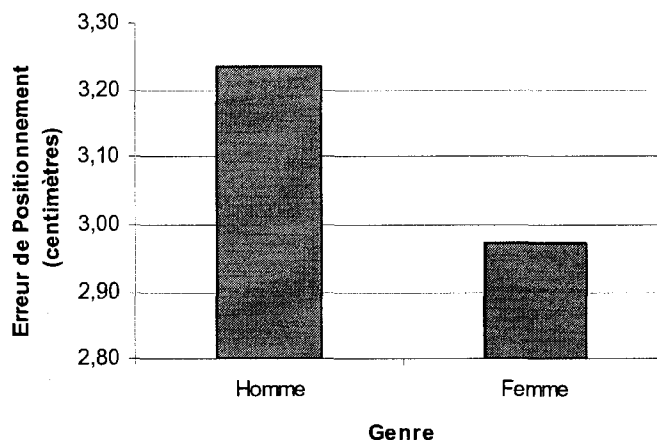


Figure 4.8 : Erreur de positionnement moyenne pour chaque genre

On voit bien dans les tableaux et figures précédents que les femmes sont moins rapides mais plus précises que les hommes. On ne peut par contre pas tirer de conclusions définitives quant au genre dû au nombre réduit de sujets féminins ayant pris part à notre expérience.

En termes d'écarts relatifs, on note une différence de 19% entre les genres au niveau des temps totaux moyens, ce qui est considérable. Cela semble donc un point à investiguer davantage lors d'expériences ultérieures à ce sujet.

Les tableaux suivants donnent les résultats quant à l'impact du bruit introduit par les senseurs de positions sur les temps mesurés.

Tableau 4.13 : Temps d'essais total moyen en fonction du bruit de senseur (secondes)

Bruit de senseur	TEssai Moyenne	TEssai Erreur std.	TEssai -95%	TEssai +95%	N
0	5,17	0,22	4,72	5,61	50
1	6,04	0,26	5,53	6,56	25

Tableau 4.14 : Temps de sélection moyen en fonction du bruit de senseur (secondes)

Bruit de senseur	TSelec Moyenne	TSelec Erreur std.	TSelec -95%	TSelec +95%	N
0	1,37	0,08	1,21	1,52	50
1	1,51	0,09	1,34	1,69	25

Tableau 4.15 : Temps de déplacement moyen en fonction du bruit de senseur (secondes)

Bruit de senseur	TDepla Moyenne	TDepla Erreur std.	TDepla -95%	TDepla +95%	N
0	3,80	0,19	3,41	4,19	50
1	4,53	0,22	4,08	4,98	25

Il y a une concordance parfaite entre la variable « bruit de senseur » et les moyennes observées. On constate effectivement que le bruit de senseur a eu comme conséquence une augmentation des temps d'essais mesurés de l'ordre de 14% pour l'ensemble des sujets. Le bruit de senseur est donc un facteur ayant fortement influencé les résultats de cette expérience. Il s'avère nuisible aux performances des utilisateurs lors de l'utilisation d'une interface d'un système RV.

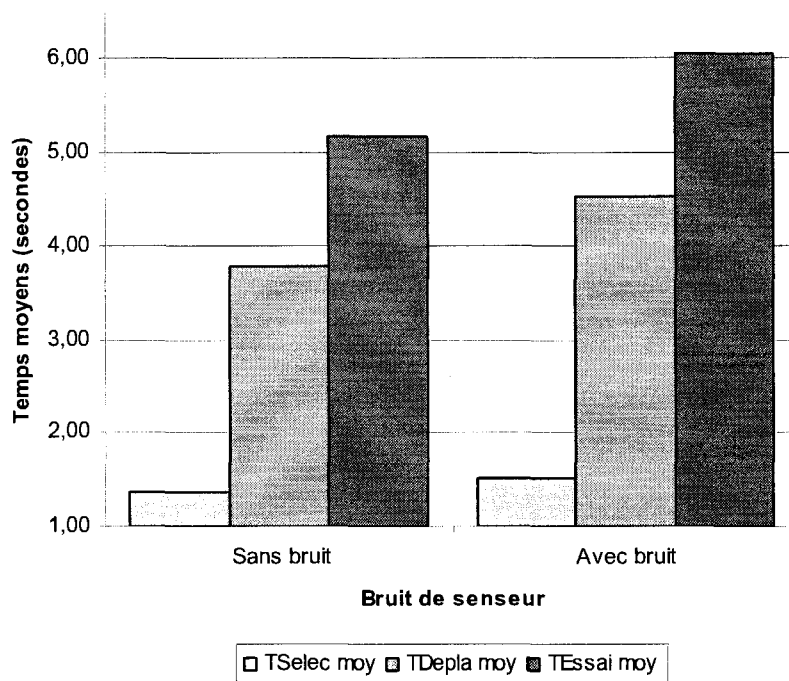


Figure 4.9 : Temps d'essai total moyen en fonction du bruit de senseur

Le tableau 4.16 donne les résultats relatifs à l'erreur de positionnement en fonction du bruit de senseur.

Tableau 4.16 : Erreur de positionnement moyenne en fonction du bruit de senseur (centimètres)

Bruit de senseur	EPos Moyenne	EPos Erreur std.	EPos -95%	EPos +95%	N
0	2,96	0,15	2,65	3,26	50
1	3,25	0,17	2,90	3,60	25

Le bruit a eu un impact sur la précision de positionnement de l'ordre de 8%. Selon ces résultats, l'impact sur la précision est moins important que sur les temps totaux de manipulation. Une interprétation possible est que le bruit provoque une hésitation du sujet lors de l'initiation d'un mouvement. Se basant sur les données précédentes, cette hésitation semble dominer sur l'erreur de positionnement.

Ces observations nous démontrent qu'il y a eu un effet non négligeable sur nos résultats qui est dû à des limitations d'ordre technique relativement à l'appareillage utilisé. La figure 4.10 illustre l'erreur de positionnement en fonction du bruit de capteur.

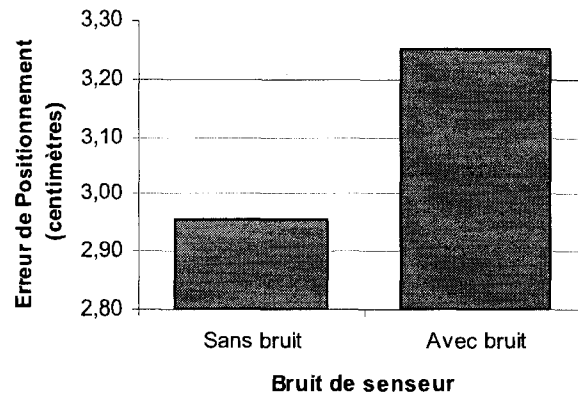


Figure 4.10 : Erreur de positionnement moyenne en fonction du bruit de capteur

4.3.2 Analyses de variance

Nous avons effectué une analyse de variance multifactorielle sur les données recueillies. La colonne SS représente la somme des carrés (sum of square). La colonne MS représente les carrés moyens (mean square). La colonne F représente le coefficient de la courbe de distribution de Fisher et p la probabilité que l'effet ne soit pas significatif. Les résultats statistiquement significatifs ($p < 0.05$) ont été marqués en italique gras et en grisé dans les tableaux qui suivent.

En ce qui a trait aux temps d'essai moyens (TEssai) et aux temps de déplacement moyens (TDepla), on note que les seuls effets significatifs sont ceux relatifs au genre et au bruit de lecture. Pour l'ensemble de nos analyses, nous ne pouvons nous prononcer sur les résultats relatifs au genre car le nombre de sujets de genre féminin (N=4) est insuffisant et largement inférieur en proportion aux sujets masculins (N=11). Nous incluons tout de même le facteur genre dans nos analyses pour voir les nuances à ce niveau, même si ces résultats ne sont pas statistiquement forts.

Débutons avec les résultats de l'analyse de variance des temps d'essais moyens donnés au tableau 4.17.

Tableau 4.17 : Analyse de variance du temps d'essai moyen (Tessai)

	SS	MS	F	p
Repère	5,16	1,29	0,86	0,49
Genre	25,92	25,92	17,26	0,00
Bruit de lecture	9,12	9,12	6,07	0,02
Repère * Genre	4,19	1,05	0,70	0,60
Repère * Bruit de lecture	1,57	0,39	0,26	0,90
Genre * Bruit de lecture	0,03	0,03	0,02	0,89
Repère * Genre * Bruit de lecture	4,23	1,06	0,70	0,59
Erreur	81,08	1,50		
Total	142,44			

Les interactions entre les facteurs sont négligeables, ayant des $F < 4$ et $p > 0,05$ (5%). Ceci nous permet de considérer les effets principaux sur les facteurs uniques, pris indépendamment un à un. Comme le montre le tableau 4.18, le repère est statistiquement significatif dans le cas du temps minimum de sélection. Le genre est également statistiquement significatif.

Tableau 4.18 : Analyse de variance du temps minimal de sélection (TSelect)

	SS	MS	F	p
Repère	1,05	0,26	3,77	0,01
Genre	0,36	0,36	5,22	0,03
Bruit de lecture	0,01	0,01	0,14	0,71
Repère * Genre	0,19	0,05	0,70	0,60
Repère * Bruit de lecture	0,70	0,17	2,50	0,053
Genre * Bruit de lecture	0,13	0,13	1,82	0,18
Repère * Genre * Bruit de lecture	0,62	0,15	2,22	0,08
Erreur	3,75	0,07		
Total	7,46			

Pour le temps de manipulation (TDepla), on peut voir dans le tableau 4.19 que les

facteurs significatifs sont le genre et le bruit de lecture.

Tableau 4.19 : Analyse de variance du temps de déplacement moyen (TDepla)

	SS	MS	F	p
Repère	4,85	1,21	1,01	0,41
Genre	11,12	11,12	9,22	0,00
Bruit de lecture	6,73	6,73	5,58	0,02
Repère * Genre	2,28	0,57	0,47	0,76
Repère * Bruit de lecture	2,99	0,75	0,62	0,65
Genre * Bruit de lecture	0,01	0,01	0,01	0,92
Repère * Genre * Bruit de lecture	3,45	0,86	0,72	0,59
Erreur	65,12	1,21		
Total	105,59			

Le tableau 4.19 illustre l'erreur de positionnement moyenne pour laquelle aucun facteur ne s'est démarqué comme statistiquement significatif. Nous devons toutefois garder à l'esprit qu'il existe des variations non négligeables entre les valeurs moyennes comme nous l'avons vu à la figure 4.6.

Tableau 4.20 : Analyse de variance de l'erreur de positionnement moyenne (TDepla)

	SS	MS	F	p
Repère	3,51	0,88	1,20	0,32
Genre	0,96	0,96	1,31	0,26
Bruit de lecture	1,18	1,18	1,61	0,21
Repère * Genre	2,83	0,71	0,96	0,43
Repère * Bruit de lecture	2,83	0,71	0,96	0,43
Genre * Bruit de lecture	0,00	0,00	0,00	1,00
Repère * Genre * Bruit de lecture	1,32	0,33	0,45	0,77
Erreur	40,35	0,73		
Total	51,56			

4.3.3 Performances en fonction du repère

Faisant abstraction du genre et du bruit de mesure, le repère 3 a donné les meilleures performances, c.-à-d. le repère fixe par rapport à la position et la direction (1 axe) du corps de l'utilisateur. Ce repère partage quatre degrés de liberté avec le référentiel du corps de l'utilisateur. Le repère 5 suit de près en termes de performances. Il partage six degrés de liberté avec le référentiel du corps de l'utilisateur. Nous reviendrons plus loin sur la relation entre le nombre de degrés de liberté et les performances.

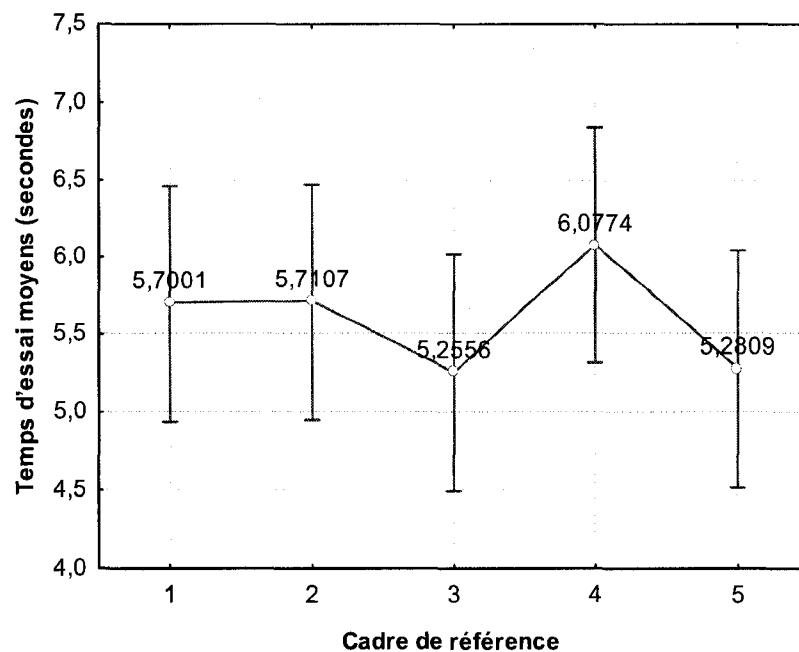


Figure 4.11 : Temps d'essai totaux moyens pour chaque repère

Les repères 3 et 5 sont ceux qui offrent les meilleurs temps d'essai moyens. Le repère 4, relatif à la main non dominante, est celui qui a eu les pires temps d'essai. La figure 4.11 illustre graphiquement ces résultats. Plusieurs causes peuvent expliquer cette situation. En premier lieu, le repère 4 utilise trois senseurs de position plutôt que deux pour les quatre autres repères. Ceci implique une source supplémentaire de bruit de lecture, créant davantage d'instabilité sur la position du panneau de dialogue. Il sera donc davantage difficile pour l'utilisateur d'effectuer les manipulations car il devra

compenser pour les mouvements induits par chacun de ces senseurs.

En effet, chaque senseur de position est en réalité une série de trois antennes directionnelles qui captent des signaux radiofréquences émis par l'émetteur du système. Le bruit provient de diverses sources de champs électromagnétiques comme les lignes hautes tensions. Le bruit sur les données de positions et d'orientations retourné par le système de suivi de position a une distribution gaussienne. Chacun des senseurs utilisés perçoit ce bruit qu'il transmet au système de suivi de position avec le signal utile. Le bruit perturbe de manière aléatoire les positions perçues, et ce, avec des erreurs différentes dans le temps pour chaque senseur. Ceci revient à dire que si le bruit du senseur 1 fait en sorte que la position soit de x millimètres trop à gauche, le senseur 2 peut exhiber une erreur de y millimètres vers le haut ou n'importe quel autre axe, de manière aléatoire. Lorsque les positions retournées par ces senseurs sont combinées de manière à être liées les unes aux autres, ces erreurs se combinent effectivement elles aussi vectoriellement pour donner un déplacement composite z qui est la somme vectorielle de toutes les erreurs présentes. C'est de cette manière que les erreurs s'additionnent et deviennent donc plus importantes en fonction du nombre de senseurs (c.-à-d. de sources de bruit) utilisés. Ceci affecte directement la coordination de mouvement de l'utilisateur face au panneau de dialogue car le bruit introduit dans le système varie rapidement dans le temps, causant des mouvements oscillatoires rapides et perceptibles des objets virtuels tels les panneaux de dialogue.

Comme les résultats d'analyses étaient statistiquement significatifs pour le temps de sélection minimum, regardons de plus près ces résultats à l'aide d'un graphique.

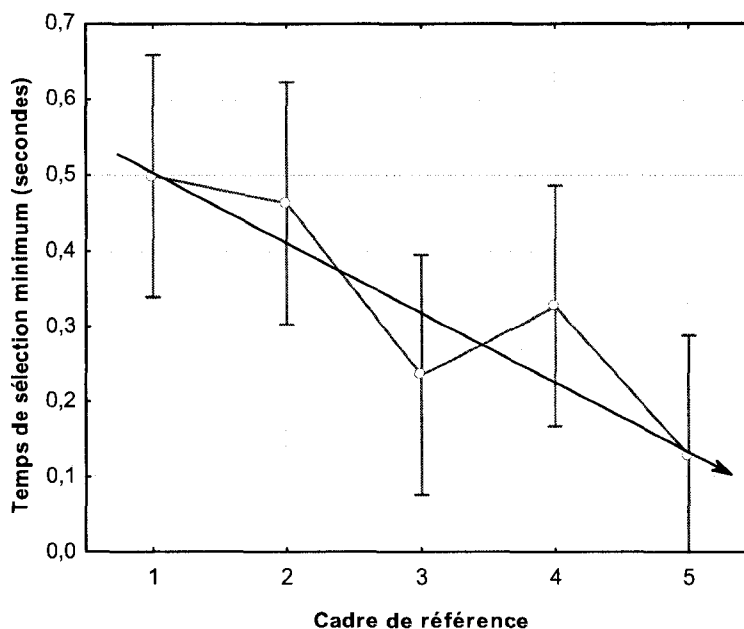


Figure 4.12 : Temps de sélection minimum pour chaque repère

L'ordre de présentation des repères sur la figure 4.12 est selon un ordre croissant de degrés de liberté partagés entre le repère du panneau de dialogue et le repère du corps de l'utilisateur. Nous utilisons l'ordre tel que donné au tableau 4.1. Nous pouvons voir sur la figure que les temps de sélection diminuent lorsque le nombre de degrés de liberté partagés entre le repère du panneau et celui de l'utilisateur augmente.

Le repère 1 se caractérise par le fait qu'il ne dépend d'aucun senseur de position. En contrepartie, comme il est fixe par rapport à la scène (au monde virtuel), il devient mobile par rapport à l'utilisateur. Chaque mouvement de l'utilisateur se traduit par un mouvement opposé du panneau de dialogue tel que perçu au niveau du repère de l'utilisateur. Par exemple, lorsque l'utilisateur se déplace vers le menu, du point de vue de l'utilisateur, c'est le menu qui va en direction de celui-ci suivant une trajectoire de sens opposé. De même, si l'utilisateur se baisse vers le sol, le menu aura l'impression de monter vers le plafond aux yeux de ce dernier. Ceci rend plus difficile pour l'utilisateur la tâche de coordonner ses mouvements car le menu est perçu comme étant mobile du

point de vue de l'utilisateur.

La figure 4.13 illustre les résultats relatifs à l'erreur de positionnement. On observe que le repère 3 donne les meilleures performances. Le repère 5 affiche quant à lui une moins bonne performance que les quatre autres repères au niveau des temps minimums d'essai. Ici, deux des cinq repères ont eu des performances inférieures aux autres. Il s'agit des repères 1 et 4.

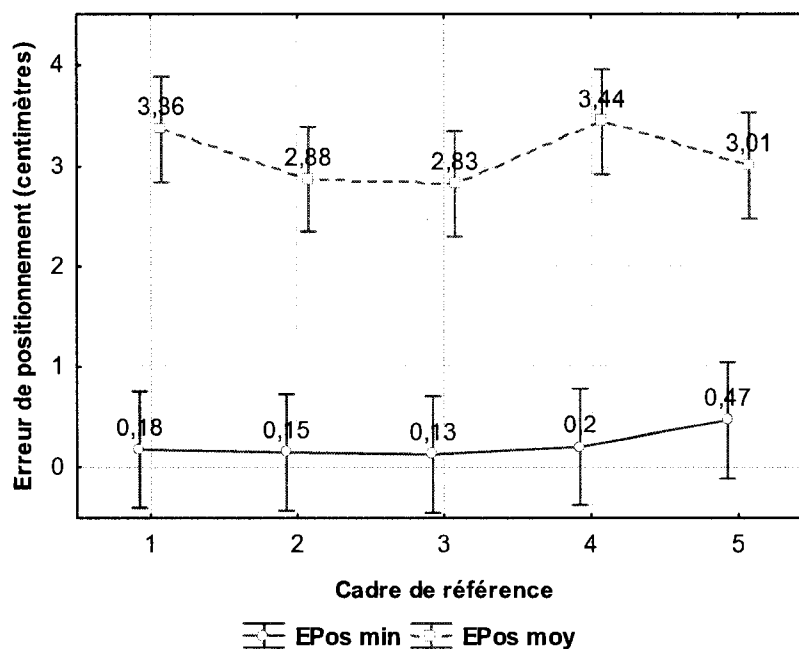


Figure 4.13 : Erreur de positionnement pour chaque repère

Encore ici, ces résultats tendent à indiquer que plus le repère du menu partage de degrés de liberté avec le repère de l'utilisateur, plus la vitesse et la précision de manipulation sont élevées.

4.3.4 Courbe d'apprentissage

La figure 4.14 donne la courbe d'apprentissage des sujets pour ce qui est du temps total d'essai. L'apprentissage observé est accentué au début d'un bloc d'essai pour ensuite atteindre un minimum vers le 24e essai. Par la suite s'en suit une légère dégradation des

performances montrant ce que l'on peut interpréter comme l'apparition de signes de fatigue sur les 5 ou 6 derniers essais. Cela montre que le nombre d'essais utilisé pour cette expérience est approprié. Cela dénote également que l'utilisation du système RV requiert un certain temps d'apprentissage avant que l'utilisateur devienne confortable avec les manipulations à effectuer.

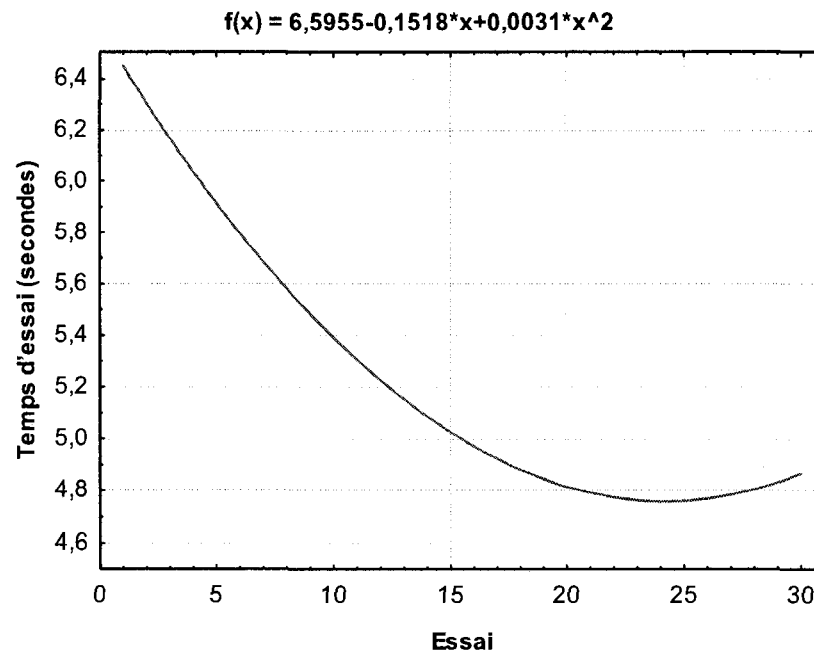


Figure 4.14 : Courbe d'apprentissage en fonction des temps d'essai

La figure 4.15 donne la courbe d'apprentissage pour ce qui est de l'erreur de positionnement en fonction des essais effectués. Ici, l'apprentissage est plus rapide pour atteindre un minimum vers le 16^e essai. Par contre, une dégradation rapide des performances survient après le 16^e essai, ce que nous interprétons comme l'effet de la fatigue. Celle-ci se manifeste plus tôt pour ce qui est des erreurs de manipulations que le temps de manipulation.

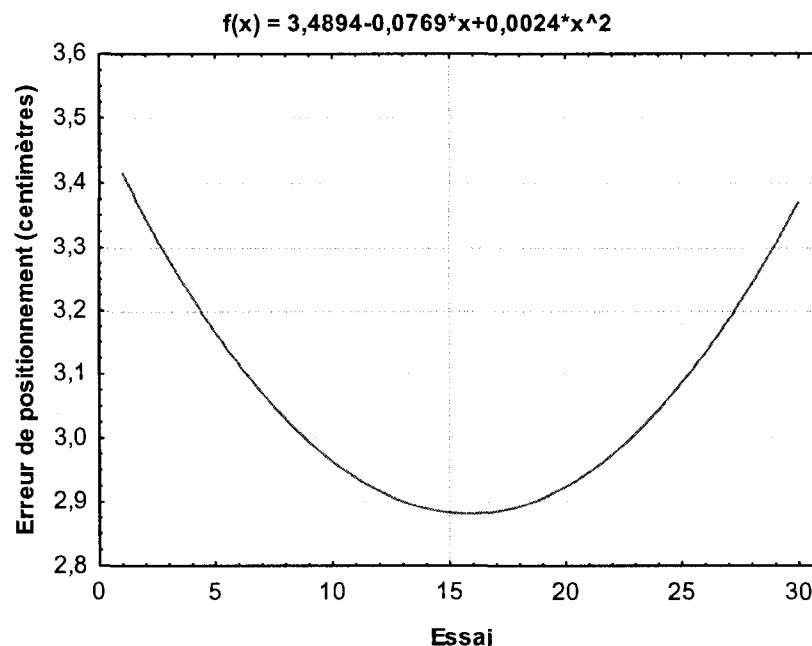


Figure 4.15 : Courbe d'apprentissage en fonction de l'erreur de positionnement

4.3.5 Différences attribuables au genre

Le genre est un facteur qui influence fortement les performances globales de l'utilisateur comme nous l'avons précédemment noté dans les résultats de l'analyse de variance. En raison du nombre restreint de sujets féminins qui étaient disponibles lors de notre expérience, nous ne pouvons toutefois tirer de conclusions solides sur l'effet du genre sur les performances de l'utilisateur. La discussion qui va suivre ne permet que d'évoquer un possible effet du facteur genre sur les performances et doit donc être considérée avec prudence.

Dans la Figure 4.16, on observe que les femmes sont en général moins rapides que les hommes. Cet écart de performance est de plus d'une seconde en moyenne par essai. Cette différence de performance ne semble pas être spécifique à une tâche en particulier comme de manipuler le curseur ou de le sélectionner car les deux courbes ont des pentes similaires. Cela confirme qu'il existe une différence propre au genre de l'utilisateur.

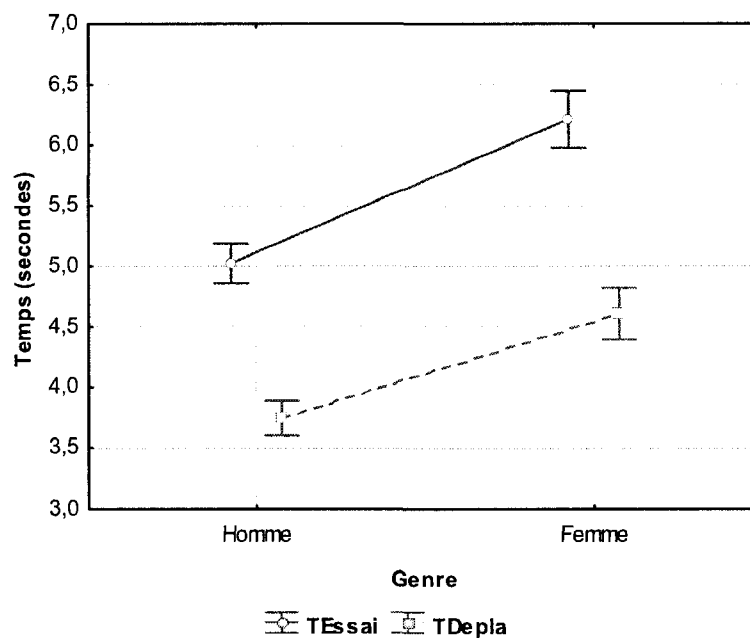


Figure 4.16 : Temps d'essai en fonction du genre

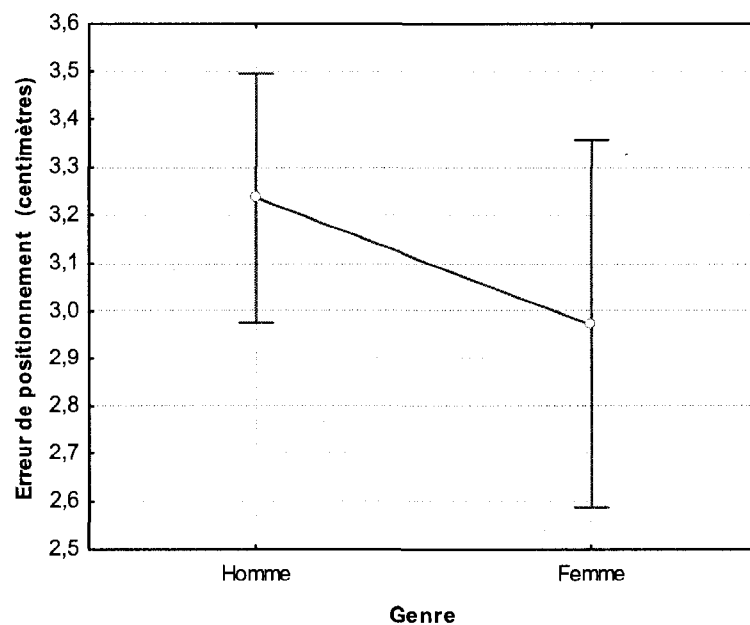


Figure 4.17 : Erreur de positionnement en fonction du genre

Par contre, si on regarde du côté de la précision de manipulation des IHM, les femmes sont plus performantes que les hommes. Un autre point que l'on note en regardant la

figure 4.17 est que la variabilité est plus grande chez les femmes que chez les hommes. Les femmes sont donc plus précises en général mais ont des performances moins constantes ou stables.

4.3.6 Résultats qualitatifs

Les résultats qualitatifs se répartissent en deux groupes. Il y a d'abord les données subjectives recueillies sous forme de commentaires verbaux entre chaque essai d'expérience. Le second groupe de résultats quantitatifs provient des réponses recueillies par l'entremise du questionnaire.

Le tableau 4.21 donne une compilation du nombre d'occurrences des principaux commentaires verbaux faits par les sujets tout au long de l'expérience. Comme chaque sujet exprimait ses impressions de manière différente, nous avons effectué un regroupement des commentaires qui nous ont semblé similaires et avons reformulé la phrase du commentaire de manière à exprimer le plus clairement possible chaque point important soulevé par les sujets.

Tableau 4.21 : Commentaires des sujets face à l'expérience 1

Commentaire	Nombre d'occurrences	Occurrence en %
Les menus ne sont pas alignés / pas à l'échelle	3	20,00%
La capacité à pouvoir manuellement changer l'emplacement du menu semble être un facteur important	3	20,00%
Le relâchement du curseur est difficile	2	13,33%
J'aime la transparence des menus	1	6,67%
Problème de contraste de la scène avec le HMD	1	6,67%
Une ombre de la main serait bien	1	6,67%
La main virtuelle obstrue la vue sur le curseur	1	6,67%
La distance main / tête semble être un facteur important	1	6,67%

Les trois principaux commentaires faits par les sujets sont : 1) qu'une mauvaise concordance des échelles entre la scène virtuelle et les mouvements des membres réels de l'utilisateur est une source de confusion nuisible qui est facilement perceptible; 2) qu'il est souhaitable que l'utilisateur puisse contrôler le positionnement des panneaux de dialogue de manière manuelle; et 3) que le relâchement du curseur virtuel n'est pas une tâche nécessairement facile à exécuter de la manière qu'elle était implémentée dans l'expérience 1. Les deux premiers commentaires sont reliés aux repères car ils affectent la perception du positionnement des panneaux de dialogue dans l'espace. Le troisième commentaire est plus lié à des limitations d'ordre technique pour ce qui est de la précision de pointage permise par les équipements RV utilisés.

À la fin de l'expérience, chaque sujet était invité à répondre à des questions subjectives, nous permettant de voir si les résultats quantitatifs mesurés concordaient avec les impressions des sujets d'expérience. Les tableaux qui vont suivre donnent le sommaire des réponses perçues auprès des sujets par le biais du questionnaire.

Nous avons demandé à chacun des 15 sujets ayant participé à l'expérience de nous indiquer sa préférence globale à propos des repères. Le tableau 4.22 donne la compilation des résultats recueillis.

Tableau 4.22 : Préférence des sujets relatif au repère

Repère	Description	Nombre de votes	Votes en %
1	Fixe (scène)	1	6,67%
2	Position	2	13,33%
3	Position + orientation	4	26,67%
4	Main gauche	6	40,00%
5	Fixe (tête)	2	13,33%

La Figure 4.18 illustre ces résultats.

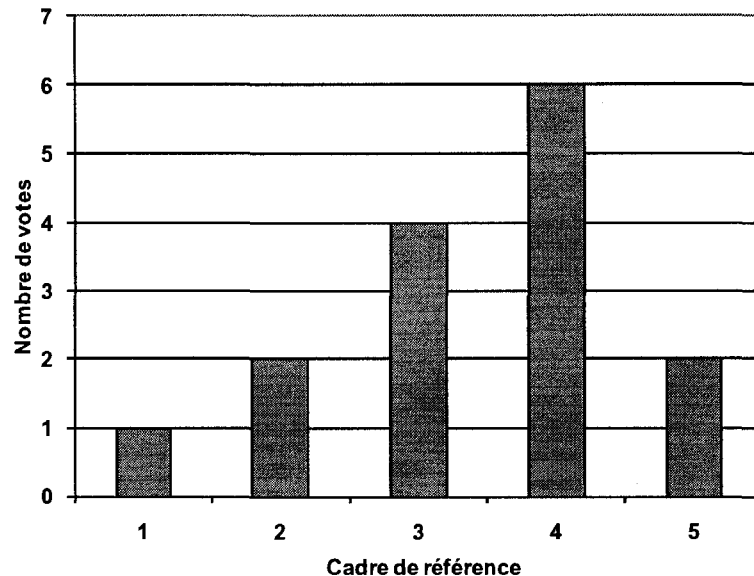


Figure 4.18 : Préférence des sujets relative au repère

Étonnamment, le repère 4 a été préféré par le plus grand nombre de sujets. Les sujets ont donc majoritairement préféré le pire repère du point de vue des performances mesurées. Ceci peut être attribuable à la nature de fonctionnement de ce repère. Plusieurs études ont démontré l'importance de la main non dominante dans un contexte d'interaction bimanuelle avec des IHM (Guiard 1988; Hinckley, Pausch, Proffitt, Patten et Kassell 1997; Kurtenbach, Fitzmaurice, Baudel et Buxton 1997). L'utilisation des deux mains dans le cadre d'une interaction permet de faire intervenir le sens de proprioception que possède la majorité de la population¹ qui permet une meilleure coordination des mouvements des mains de l'utilisateur. Le sens de proprioception se définit comme suit :

“ The unconscious perception of movement and spatial orientation arising from stimuli within the body itself. [Latin proprius, one's own + (RE)CEPTION.] ”, Britannica Concise Encyclopedia

¹ Certaines maladies neurologiques ou dysfonctions du cerveau humain peuvent impliquer une perte temporaire ou permanente des capacités proprioceptives chez certains individus.

Des données sur les niveaux de fatigue ressentis par les sujets au cours de l'expérience ont été recueillies afin de déterminer si l'utilisation de la plateforme de test RV et l'utilisation de panneaux de dialogue causaient des niveaux de fatigue inacceptables. Les résultats du tableau 4.23 indiquent que l'utilisation du système RV ne causait pas de forte fatigue ou de fatigue très élevée durant l'expérience.

Tableau 4.23 : Occurrences des niveaux de fatigue rapportés par les sujets

niveau de fatigue	Nombre de votes	Votes en %
0 - nulle	1	6,67%
1 - faible	7	46,67%
2 - moyenne	7	46,67%
3 - forte	0	0,00%
4 - très élevée	0	0,00%

Nous avons aussi demandé aux sujets de nous indiquer les sensations d'inconfort perçues à la fin de la séance d'expérimentation. Le tableau 4.24 montre la liste des symptômes rapportés par les sujets.

Tableau 4.24 : Occurrences des symptômes rapportés par les sujets

Symptôme	Occurrences
Vision floue	4
Tension au cou	2
Maux de dos	2
Fatigue du bras	2

Le principal symptôme rapporté par les sujets est une fatigue oculaire qui se manifeste par une vision floue et que nous attribuons à la faible résolution ainsi qu'au champ de vision restreint du casque immersif utilisé. Il est à noter que le plan image des optiques du casque immersif utilisé est situé à environ 1 mètre de l'œil. Comme la distance d'opération lors de nos expériences se situe entre 40 et 70 cm, c.-à-d., la distance où les

objets virtuels étaient affichés, la fatigue ayant pu être occasionnée par une discordance entre l'accommodation et la convergence oculaire du sujet était faible. À cette distance de travail, l'effort musculaire d'accommodation est inférieur à celui pouvant être ressenti lors de la lecture d'un livre durant une période similaire.

Les tensions au cou qui sont rapportées peuvent s'expliquer par le fait que le faible champ de vision du casque immersif force l'utilisateur à tourner davantage la tête plutôt qu'à orienter ses yeux pour regarder autour de lui. Une autre cause de ces maux de cou est probablement reliée au fait que le repère 5 impose une stabilité accrue de la tête afin de pouvoir manipuler l'IHM fixe par rapport à la tête. Les maux de dos peuvent être attribuables, selon nous, au fait que nous demandions aux sujets de rester debout tout au long de l'expérience, d'une durée de près d'une heure. Un fait intéressant à noter est que les sujets ne se sont pas plaints de fatigue durant l'expérience, tendant à appuyer les observations faites par d'autres chercheurs que l'utilisation d'une simulation présentée dans un casque immersif permet de détourner les points d'intérêt et de concentration d'un individu et de diminuer leur sensibilité à certains stimuli externes causant la douleur¹. Finalement, la fatigue du bras est aisément explicable par le fait que le sujet devait constamment pointer du doigt des boutons sur les IHM présentées. Son bras était donc souvent maintenu en position horizontale, ce qui implique un effort musculaire constant et maintenu.

¹ Plusieurs recherches ont été menées sur les techniques de réduction de la douleur par l'utilisation de la RV. Les travaux de H.G. Hoffman sont particulièrement notables. Leur environnement virtuel nommé « Snow World » permet des interventions douloureuses de réhabilitation sur des patients souffrant de brûlures sévères avec des diminutions notables de la douleur ressentie. (Hodge, Anderson, Burdea, Hoffman, et Rothbaum 2001)

4.4 Discussion

4.4.1 *Repère optimal*

D'après l'ensemble des résultats, le repère 3 ressort comme étant le meilleur pour ce qui est des performances de l'utilisateur. Le repère 4 est nettement moins performant, ce qui peut s'expliquer par l'utilisation d'un senseur de position additionnel ainsi que l'utilisation de deux mains, toutes deux en mouvement. Ce sont des facteurs qui ajoutent de l'instabilité et de l'imprécision au niveau des manipulations de l'IHM par l'utilisateur.

4.4.2 *Précision versus temps de manipulation*

Il ressort également que l'erreur de positionnement est plus affectée que le temps de manipulation par le repère utilisé. Comme un des principaux sens utilisé par le sujet est la vision, on peut s'attendre à ce qu'il y ait une relation entre l'erreur de positionnement et la quantité d'information visuelle perçue. On fait référence ici à la résolution d'affichage, c.-à-d. à la quantité d'éléments d'affichages (angl. : pixels) utilisés par le dispositif d'affichage. Le casque immersif utilisé dans cette expérience dispose d'une résolution de 800 x 600 éléments couleurs affichés sur un champ de vision de 26 degrés en diagonale. Par calculs, on obtient la résolution angulaire, plus utile pour évaluer la résolution perçue par l'utilisateur. On parle de résolution perçue car elle diffère de la résolution du dispositif d'affichage et est déterminée par les caractéristiques des composantes optiques utilisées dans le casque de visualisation. Le même nombre d'éléments d'affichage, soit 800 x 600 ici, peut permettre de lire du texte ou non à l'intérieur d'un casque immersif dépendamment à la fois de la résolution des écrans miniatures utilisés et du champ de vision prescrit par les composantes optiques (les lentilles et miroirs) utilisées. Pour permettre une évaluation plus facile de la résolution telle que perçue par l'utilisateur, on a donc plutôt recours à la notion de résolution angulaire. Celle-ci se base sur la taille d'un élément de scène perçu en fonction de

l'angle sous-tendu de cet élément tel que perçu par l'œil. La résolution angulaire se calcule comme suit :

$$\begin{array}{l} \text{Résolution angulaire} \\ \text{horizontale} \\ \text{(minutes d'arc/pixel)} \end{array} = \frac{1 \text{ min d'arc}}{1/60 \text{ degré}} \cdot \frac{\text{Champ de vision couvert}}{\text{Résolution horizontale (pixels)}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Soit dans le cas présent :

$$\frac{1 \text{ min d'arc}}{1/60 \text{ degré}} \cdot \frac{26 \text{ degrés}}{800 \text{ pixels}} = 1.95 \text{ min d'arc/pixel} \quad (\text{Eq. 3})$$

L'œil humain a une acuité visuelle moyenne de 1 minute d'arc¹ quant à l'objet le plus petit pouvant être perçu à l'œil nu. Le casque immersif utilisé dans le cadre de cette expérience affiche donc une scène dont la résolution perçue est près de deux fois inférieure à l'acuité visuelle du sujet. Cela peut occasionner une perte de précision de manipulation due à la perte de résolution de la rétroaction visuelle sur laquelle se base le sujet.

La résolution angulaire du dispositif d'affichage c.-à-d. du casque immersif est constante, peu importe le positionnement des objets virtuels dans la scène. Par contre, plus un objet est loin de l'observateur, plus le nombre d'éléments d'image (pixels) disponibles pour le représenter visuellement sera réduit. Donc, pour les repères où les menus apparaissent près du corps de l'utilisateur, la résolution, et par le fait même, la quantité et la qualité de la rétroaction seront supérieures. En effet, certains repères imposent une distance fixe et déterminée entre le panneau de dialogue et l'utilisateur alors que d'autres repères permettent une distance utilisateur / panneau de dialogue

¹ Une acuité visuelle dite « normale » ou 20 / 20 est définie par l'habileté à percevoir un point de résolution égal à 1 arc minute à une distance de 20 pieds sur une charte de Snellen (John M Evans LLC 2006). Il est possible pour l'humain de percevoir des objets de taille inférieure à 1 minute d'arc dans certaines conditions.

variable.

4.4.3 Discussion concernant les bruits de lecture

Les erreurs dues aux bruits de lecture sont un phénomène courant chez les systèmes de suivi de position magnétiques (c.-à-d. qui utilisent une onde électromagnétique). On distingue deux types de bruits de lecture :

1. statique $\rightarrow$ écart entre la position ou l'orientation mesurée (perçue) par le système de suivi et la position ou l'orientation réelle dans le monde physique.
2. dynamique $\rightarrow$ fluctuations dans le temps de la position ou de l'orientation retournée par le système de suivi lorsque le senseur est immobile dans le monde physique.

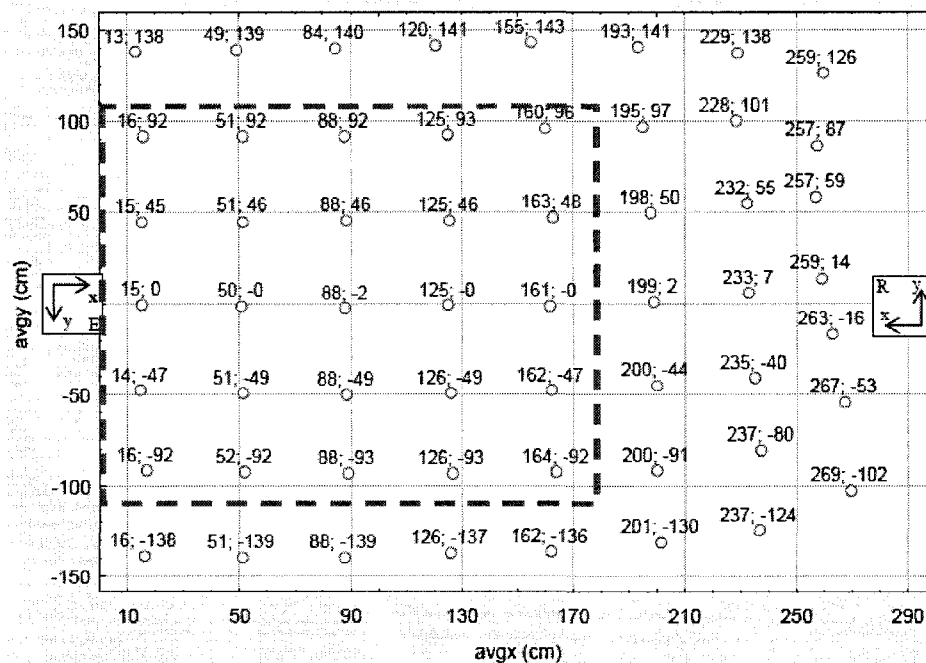
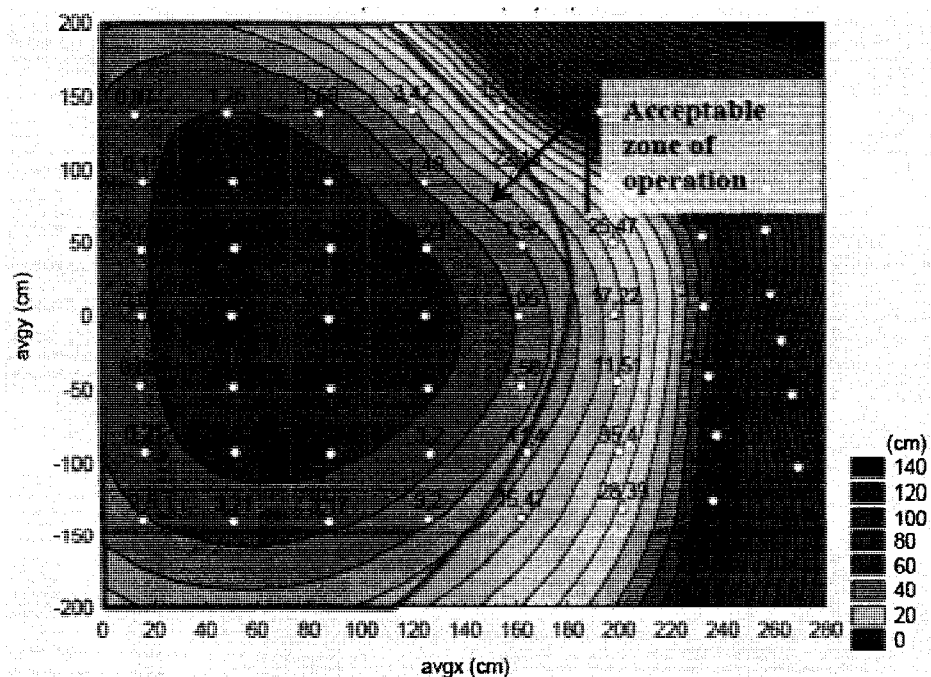


Figure 4.19 : Erreur statique de position du système de suivi

La figure 4.19 donne l'erreur statique typique pour le système de suivi utilisé lors de nos expériences. Les paires de coordonnées x,y , telles que mesurées par le système de suivi, sont données à chaque point de la grille. La position mesurée résultante est également indiquée visuellement par un point. L'émetteur est situé au centre de l'axe des ordonnées à gauche et est représenté par un carré identifié par un « E ».

Les figure 4.20 et figure 4.21 illustrent l'erreur cumulative mesurée sur les trois axes (X, Y et Z). Le nombre indiqué est donc la somme des trois écarts de position ou d'orientation mesurée par le système de suivi. Par exemple, à l'intérieur de la zone verte foncée située entre 20 et 120 cm de l'émetteur pour ce qui est de l'erreur de position, l'erreur cumulative est inférieure à 3 cm, soit approximativement 1 cm d'écart sur chacun des axes x , y et z . Pour la majeure partie de cette zone, l'erreur est en fait inférieure à 1/3 cm par axe, ce qui reste dans des limites d'utilisation raisonnables pour nos expériences.



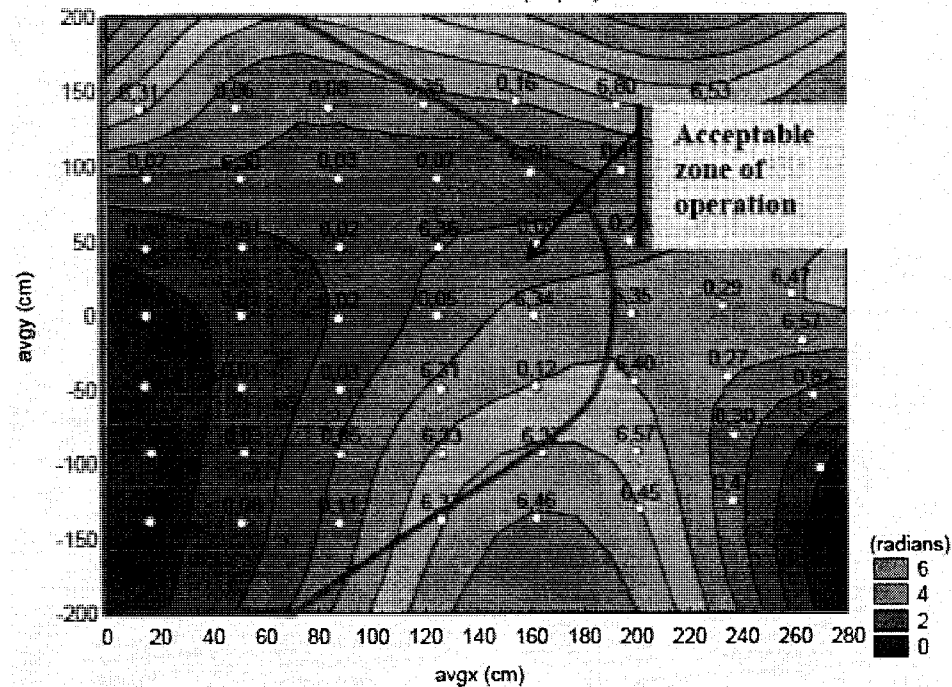


Figure 4.21 : Erreur statique d'orientation du système de suivi

Comme on peut le constater, l'erreur statique est relativement faible à l'intérieur de la zone marquée d'un trait rouge sur les figures. Elle augmente par la suite rapidement, de manière exponentielle, dans le cas de la position pour atteindre des seuils où l'utilisation des positions retournées n'est plus possible.

La figure 4.22 donne une vue en perspective 3D de l'évolution des erreurs statiques permettant de mieux voir le comportement exponentiel de l'erreur de positionnement. On voit par ailleurs que l'erreur en orientation demeure plus stable suivant la distance séparant l'émetteur et le récepteur. Par contre, l'amplitude de cette erreur est relativement forte par endroits (zones orangées), atteignant 6 radians, soit jusqu'à 2 radians (115 degrés) par axe.

Lors de nos expériences, les sujets étaient positionnés de manière à être localisés au centre de cette zone acceptable d'opération du système de suivi, soit entre 40 et 70 cm de distance de l'émetteur suivant l'axe X sur les figures et au centre suivant l'axe Y.

Donc, même s'il pouvait exister un effet sur nos mesures pour ce qui est des erreurs statiques de suivi, nous opérons dans une zone sécuritaire.

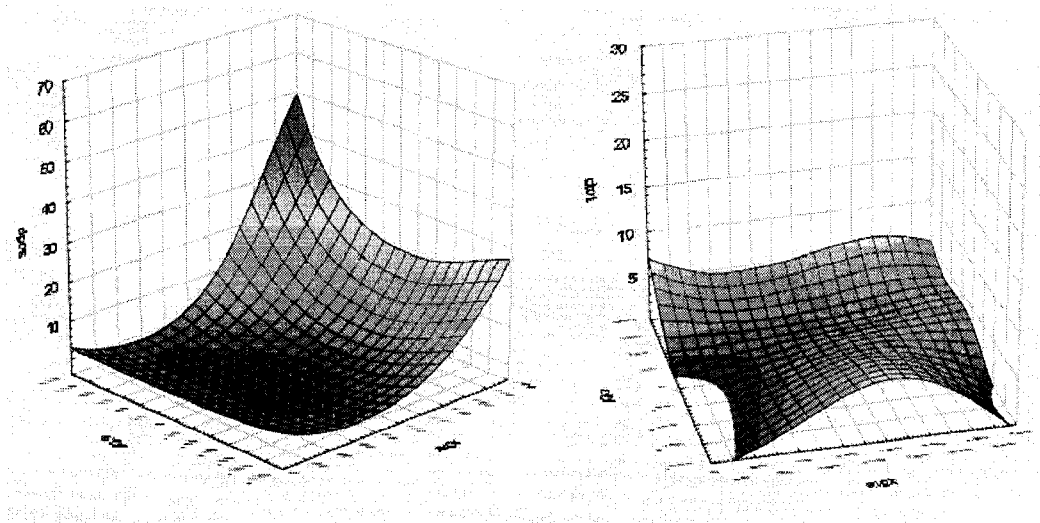


**Figure 4.22 : Graphe 3D des erreurs statiques du système de suivi
(gauche - suivant la position, droite – suivant l'orientation)**

Dans nos expériences, c'est le bruit de lecture dynamique qui peut avoir un impact négatif sur nos données. Nous mesurons des écarts de positions (des distances relatives et non pas des positions absolues), ce qui fait qu'une erreur statique de position ou d'orientation n'a pas de conséquences sur les facteurs qui nous intéressent. Par contre, les fluctuations rapides de positions et d'orientations introduites par les parasites radiofréquences font en sorte que le sujet hésite lors de ses manipulations avec les IHM.

Considérant ceci, un étalonnage du système de suivi n'aurait pas permis de significativement améliorer les conditions dans lesquelles devaient opérer les sujets. De plus, l'étalonnage ne permet pas de réduire les bruits de lecture dynamique. Le seul moyen à notre disposition pour limiter les bruits dynamiques est le filtrage des données brutes du système de suivi. Le problème avec le filtrage est qu'il introduit une latence supplémentaire. En effet, pour réduire les parasites dynamiques, il faut appliquer un filtre passe-bas, c.-à-d. qui ne laisse passer que les composantes basses fréquences (lentes) pour enlever du signal les composantes hautes fréquences (fluctuant

rapidement). Cela revient à laisser passer un signal dont la réaction est lente. Si un capteur détecte un changement rapide et légitime, le filtre ne pouvant le discerner comme légitime, enlèvera de ce signal les composantes hautes fréquences comme si ce signal était perçu comme non légitime (c.-à-d. comme étant du bruit). Le filtrage devait donc être calibré de manière à réduire les fluctuations dues au bruit à des niveaux jugés raisonnables, tout en limitant la force du filtrage pour éviter l'augmentation de la latence du SRV.

Comme les mouvements effectués par les sujets étaient relativement lents, la latence supplémentaire introduite n'avait pas de conséquences néfastes sévères sur nos données. Le but visé dans une telle situation est de trouver une calibration des paramètres de filtrages offrant le meilleur compromis compte tenu de tous ces facteurs.

Les principaux bruits de lecture étaient attribuables aux parasites électromagnétiques perçus par le système de suivi de position utilisé. L'environnement dans lequel se trouvait notre laboratoire de recherche contient plusieurs sources d'interférences potentielles. Les structures formant les murs ainsi que les plafonds et planchers sont en béton armé, contenant un grillage métallique. Ce grillage se comporte comme une source émettant une onde électromagnétique lorsqu'une autre onde électromagnétique est présente (celle émise par notre système de suivi de position en l'occurrence). Nos capteurs percevaient donc des échos parasites en plus du signal direct provenant de notre émetteur. La seconde source de parasites radiofréquences provenait des lignes d'alimentation 120 Volts qui sont présentes dans les murs de cette même structure. Les courants circulant dans ces lignes génèrent une onde électromagnétique basse fréquence (60 Hz) dont l'amplitude peut être importante à courte distance.

Nous n'avons pas d'appareils spécifiques pour mesurer le niveau de bruit électromagnétique ambiant dans la pièce. Nous avons donc utilisé les données elles-mêmes afin de déterminer le niveau de bruit de lecture. Les écarts de variations des données de position retournées par le système de suivi nous permettaient de déceler le

niveau de bruit. Ces observations se faisaient sur une plage de temps très courte, de l'ordre de quelques secondes. Nous nous intéressions à la stabilité temporelle (erreur dynamique) des échantillons de positions retournés par le système de suivi. Notre plateforme de test RV n'ayant pas d'algorithme dédié pour effectuer une tâche de surveillance sur les données, nous avons recours à une observation visuelle. Par la nature du bruit, il était facile de déterminer la présence d'un bruit de suivi nuisible par simple observation. Nous considérons la présence de bruits nuisibles lorsqu'une oscillation de la main virtuelle était visible. Cette oscillation était généralement de l'ordre de quelques centimètres et variait rapidement dans le temps. Nous avons mis la variable « bruit de lecture » à la valeur « 1 » (lectures bruitées) lorsqu'une instabilité du pointeur virtuel (la main du sujet dans le monde virtuel) était visible à l'œil. Il est également à noter que cette variable est donnée en fonction du sujet et non pas de chaque essai individuel effectué par celui-ci. Nous considérons donc l'ensemble des 150 essais d'un sujet comme étant bruités lorsque cette variable est mise à 1 pour un sujet donné. Cette façon de procéder était correcte car nos observations indiquaient que le bruit était présent tout au long de la séance pour ces cas.

Comme il était difficile, voire impossible, de contrôler les sources de bruit ambiantes, nous avons dû ajuster la position de l'émetteur et des récepteurs dans la pièce afin de déterminer un emplacement affichant les taux de bruits parasites les plus faibles. Ce processus d'optimisation fut effectué par essais et erreurs jusqu'à l'obtention de niveaux de bruits acceptables, c.-à-d. lorsque la position de la main virtuelle était stable et ne dénotait pas d'oscillations perceptibles à l'œil.

La distribution du bruit de position et d'orientation est gaussienne comme le montrent les figures figure 4.23 et figure 4.24.

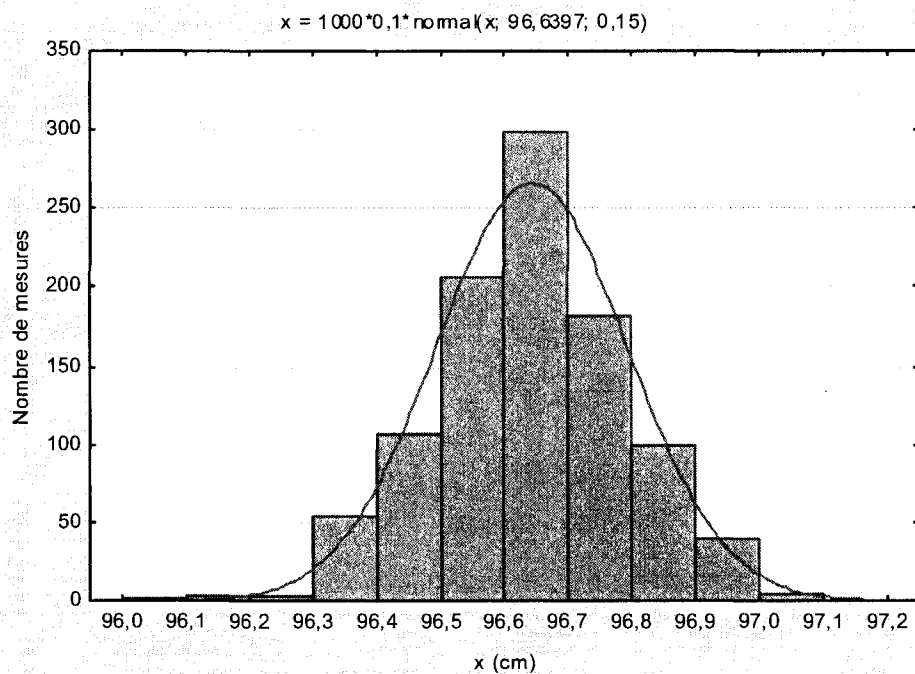


Figure 4.23 : Distribution du bruit de positionnement

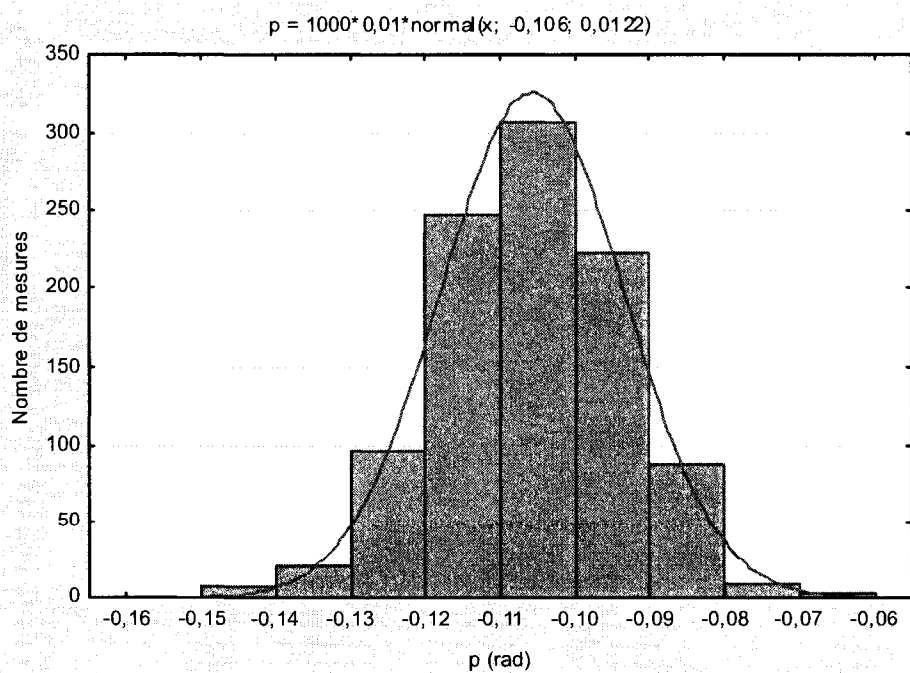


Figure 4.24 : Distribution du bruit d'orientation

Nous sommes conscients des impacts de ce bruit de lecture sur nos résultats. Toutefois, il est difficile de dire dans quelle mesure ce bruit eut un impact sur les résultats. Nous avons effectué des analyses de variance en considérant deux cas : 1) en incluant les sujets ayant dû faire face à des niveaux de bruit importants, et 2) en excluant les sujets exposés au bruit. Les résultats d'analyses de variance quant au facteur primaire, soit le repère, se sont avérés similaires. De ce fait, nous avons décidé de conserver les sujets bruités dans les analyses car cela nous donne une meilleure vision du phénomène du bruit de lecture tout en offrant plus de données pour nos analyses. Dans les faits, même si nous catégorisons un sujet comme étant bruité, le bruit étant variable au cours d'une expérience, certaines lectures affichaient quand même des niveaux acceptables de bruits. Le bruit suit une loi normale ce qui fait que le nombre de lectures prises nous permet de compenser les effets néfastes du bruit en obtenant une moyenne sur des essais répétés.

4.4.4 Considérations relatives au positionnement des panneaux de dialogue par rapport aux sujets

Dans cette expérience nous avons cherché à limiter le plus possible les effets sur les mesures de positionnement des panneaux de dialogue par rapport à la position du corps de l'utilisateur. C'est pour cette raison que nous avons introduit la notion de zone de proximité du panneau de dialogue. Ceci nous a permis de déterminer un moment précis où avait lieu le démarrage de la prise de mesures, en fonction d'une distance connue et fixe d'un essai à l'autre par rapport à la surface des panneaux de dialogue.

Cela étant dit, plusieurs facteurs relatifs au positionnement des menus peuvent avoir une influence sur les mesures. Un de ces facteurs est l'orientation de la surface du menu par rapport à la direction de regard de l'utilisateur. Le cas de vision idéale est lorsque la visée de regard est perpendiculaire (normale) à la surface du panneau de dialogue. Le cas de vision le pire est lorsque la visée est parallèle (tangentielle) à la surface, rendant impossible la vision des éléments d'interface sur la surface du menu. Pour tous les cas où l'orientation était prédéterminée (non contrôlable par l'utilisateur), nous faisons en

sorte que le menu soit perpendiculaire à la visée de l'utilisateur (condition optimale). Avec le repère 4 utilisant la main gauche, nous voulions laisser l'utilisateur libre d'effectuer les manipulations en assumant qu'il prendrait naturellement la posture la plus adéquate au fil du temps, selon son apprentissage réalisé au fil des essais. Nous ne pouvions pas effectuer de contrôle de la position ou de l'orientation de toute manière. Comme le cas de la main gauche est distinct à ce point de vue des autres cas, il est possible que cela puisse expliquer les plus faibles performances observées avec le repère 4.

La position elle-même des menus n'était pas constante d'un cas à l'autre. Par exemple, dans le cas où le menu est attaché aux mouvements de tête de l'utilisateur, le menu se trouve localisé à hauteur des yeux de celui-ci. L'utilisateur doit donc manipuler les interfaces avec le bras élevé devant lui. Dans les cas où le menu était attaché au corps de l'utilisateur, la position était plus basse, à 30 centimètres (1 pied) en dessous de la tête. Dans ce cas, la manipulation se faisait avec le bras placé plus bas, ce qui occasionne alors moins de fatigue musculaire. Pour le cas utilisant la main gauche, nous avons observé des variations de positions d'utilisation importantes d'un sujet à l'autre. Certains plaçaient le menu à hauteur des yeux alors que d'autres le plaçaient à hauteur de taille, ou à mi-chemin entre les deux.

La distance entre l'œil et la surface du menu est un autre facteur relié à la position qui n'était pas constante d'un cas à l'autre lors de nos expériences. Comme nous l'avons précédemment vu, cette distance affecte l'acuité avec laquelle l'utilisateur sera en mesure de percevoir un objet dans la scène. Ceci était particulièrement notable avec le texte affiché sur les menus. Certains sujets ont en effet fait la remarque qu'ils avaient de la difficulté à lire le texte des menus dans certaines circonstances. La lecture de texte à l'intérieur d'un casque de visualisation reste un élément critique limitant l'utilisation de tels dispositifs en RV encore de nos jours. Selon nos observations, une résolution angulaire de 1,5 arc minute par pixel ou moins est requise (rappel : plus la valeur en arc

minute est petite, meilleure est la résolution perçue, c.-à-d.. l'acuité visuelle) pour permettre la lecture de texte avec un casque de visualisation, ou tout autre dispositif d'affichage.

Il y a donc un facteur de variabilité potentiel dans nos résultats face à ces considérations de positionnement et d'orientation des menus d'un cas à l'autre. Cela dit, les variations de positionnement étaient faibles et n'invalident pas nos mesures. Dans les cas où le menu avait une position fixe par exemple, l'orientation de la surface du menu était toujours de sorte que la visée était perpendiculaire à la surface du menu et donc suivant des conditions optimales. Il en va de même avec la dimension des boutons et du curseur qui étaient de dimensions supérieures aux lettres utilisées pour les textes. Une étude plus approfondie au sujet de la relation entre l'acuité visuelle vis-à-vis le dimensionnement des éléments d'interface RV serait intéressante à effectuer. Elle nous permettrait d'obtenir une métrique précise et de mettre en équations le lien qui existe entre ces deux paramètres. L'utilité de telles équations serait de pouvoir systématiquement calculer la dimension optimale des éléments d'interfaces en fonction du matériel de visualisation utilisé.

4.4.5 Précision versus fatigue de l'utilisateur

D'après nos résultats, la fatigue de l'utilisateur affecte plus la précision de manipulation que le temps de manipulation. La précision devrait donc recevoir une attention particulière dans le design d'IHM pour des systèmes de RV. Nos conclusions auraient probablement été différentes si nous n'avions pas imposé une précision minimale afin que l'essai puisse prendre fin. Dans ce cas, nous aurions probablement perçu une corrélation plus directe et proportionnelle entre la précision et le temps de manipulation qui auraient tous deux été plus largement affectés. En imposant une précision minimale de relâchement du curseur, nous avons fait en sorte que les mesures de temps prises ont été contrôlées en partie par la précision. Cela revient à dire que l'erreur de positionnement n'était pas libre de toute contrainte. Elle était contrainte à une valeur

maximale ne représentant pas la vraie erreur de positionnement que l'on aurait mesurée en l'absence de cette contrainte. Le temps était indirectement affecté par cette contrainte sur la position, car lorsque le curseur était relâché avec trop d'erreurs de positionnement, le chronomètre continuait à incrémenter le temps de l'essai et le sujet devait saisir à nouveau le curseur, le déplacer plus près de la cible et le lâcher.

Pour ce qui est de la courbe d'apprentissage perçue, on observe que les sujets sont plus précis que rapides au début d'un bloc d'essais. Par la suite, on observe une accélération au niveau des temps de manipulation qui montre un apprentissage et une prise de confiance qui permettent aux sujets d'être plus rapides. En contrepartie, cette accélération des temps de manipulation s'accompagne d'une diminution de précision (augmentation de l'erreur de positionnement) notable à partir de la moitié du bloc d'essais qui dénote un lien inversement proportionnel entre la rapidité de manipulation et la précision. Ceci est en concordance avec la loi de Fitts¹, bien connue dans le domaine des IHM 2D. La loi de Fitts montre qu'il existe un lien inversement proportionnel entre le temps de parcours pour atteindre une cible et la dimension de celle-ci. Dans le cas présent, on considère l'erreur de positionnement comme étant la dimension de la cible. Le temps de parcours est le temps de manipulation du curseur, de sa position initiale vers l'emplacement indiqué par la flèche. Donc effectivement, plus le curseur est relâché précisément vis-à-vis la flèche (cible plus petite), plus le temps de parcours tend à augmenter.

¹ La Loi de Fitts stipule que le temps total requis pour atteindre une cible est fonction du rapport entre le déplacement requis pour atteindre la cible et la taille de la cible. Donc pour une distance constante, le temps de déplacement augmentera lorsque la taille de la cible diminuera et inversement. Dans le cas qui nous intéresse, la taille est représentée par ce que nous appelons l'erreur de positionnement. Pour relâcher le curseur plus précisément sur une plage plus étroite, il faudra plus de temps de manipulation.

4.4.6 Considérations relatives au genre des sujets

Pour ce qui est du genre du sujet, on observe que les femmes sont plus méticuleuses et appliquées que les hommes. Cela leur permet d'être plus précises de manière générale. Les femmes sont en contrepartie moins rapides et ont des résultats plus variables. Il existe un lien directement proportionnel entre la précision et la variabilité des mesures de précision. Plus le sujet s'applique pour être précis, plus il manipule longuement et ainsi développe une fatigue plus élevée. Au fil des essais, cette fatigue accrue induit des mouvements involontaires qui auront pour conséquence de produire une plus grande variabilité des positions finales du curseur. Les mouvements de nature plus machinaux chez les hommes favorisent une plus grande reproductibilité des résultats, malgré un degré de concentration moins important qui se traduit par une plus faible précision.

4.4.7 Préférences de l'utilisateur versus résultats d'analyse

Un des constats les plus surprenants fut que l'appréciation qualitative des sujets face aux cinq repères ne concorde pas avec les résultats quantitatifs. Plusieurs ont préféré le repère 4 ayant été le pire du point de vue de la performance. Cela démontre que la perception d'une interface humain-machine chez l'humain peut dépendre de facteurs autres que la rapidité et la précision. Les questions subjectives posées aux sujets évaluaient leur satisfaction générale plutôt que leur perception des performances lors des essais. Un haut niveau de satisfaction chez l'utilisateur n'implique pas nécessairement une grande performance de sa part, et vice-versa.

4.5 Conclusion

Cette expérience nous a permis d'obtenir des données quantitatives et qualitatives sur l'impact des repères des IHM RV sur les performances et la satisfaction de l'utilisateur. Il en ressort qu'un couplage entre le repère de l'utilisateur et celui des panneaux de dialogue est souhaitable. Le nombre de degrés de liberté communs entre le repère des panneaux de dialogue et celui de l'utilisateur a avantage à être le plus élevé possible. Un panneau de dialogue qui suit les mouvements du corps de l'utilisateur sera donc préférable à un panneau de dialogue fixe par rapport à la scène.

De plus, nos observations nous ont permis de constater qu'il existe une différence importante entre le degré de satisfaction des sujets et les mesures expérimentales relatives aux performances humaines de manipulation d'IHM pour SRV. Il est donc important de garder à l'esprit qu'une part importante du design d'IHM pour SRV devrait inclure une validation à la fois par des mesures quantitatives sur les temps de manipulations et les erreurs de positions mais aussi sur la satisfaction subjective des utilisateurs.

CHAPITRE 5 - MANIPULATION DES ELEMENTS D'INTERFACE VIRTUELS D'UN PANNEAU DE DIALOGUE

Expérience 2 – Étude expérimentale de l'impact sur la performance humaine de trois rétroactions visuelles dans une interface de panneau de dialogue virtuel

5.1 Introduction

La deuxième expérience que nous avons réalisée porte sur l'impact de l'utilisation de rétroactions visuelles, incluant le « système de visée » que nous avons développé, sur les performances et la satisfaction de l'utilisateur du SRV. Nous voulions déterminer dans quelle mesure les rétroactions visuelles pouvaient influencer les performances de l'utilisateur. Cette expérience vise à établir l'ordre d'importance de chacune des rétroactions visuelles étudiées. Les conclusions tirées de ces résultats permettront d'établir des recommandations face aux rétroactions visuelles utilisées dans les interfaces RV afin de fournir une fondation pour le design d'interfaces pour les SRV futurs.

5.1.1 Les trois rétroactions visuelles étudiées

Nous avons considéré trois rétroactions visuelles différentes permettant au SRV de fournir des informations à l'utilisateur sur l'état actuel de l'IHM. Les rétroactions visuelles que nous avons choisies sont les suivantes :

- Changement de couleur
- Système de visée
- Ombres projetées.

Notre choix de rétroactions fut basé sur divers facteurs. Nous avons inclus la couleur car c'est une rétroaction très répandue et largement utilisée dans le domaine des IHM 2D. Nous voulions donc l'inclure dans nos expériences pour former la base de comparaison de nos résultats. Comme la couleur est une rétroaction visuelle dont les performances sont bien connues du côté des IHM 2D, nous avons posé l'hypothèse que son apport serait également important au niveau des performances humaines pour des systèmes RV fonctionnant à trois dimensions. Son inclusion dans nos expériences nous permit donc de vérifier cette hypothèse tout en fournissant un point de comparaison avec les deux autres rétroactions visuelles pour lesquelles nous n'avions pas de données précédentes connues.

L'inclusion du système de visée fut motivée par nos observations des utilisateurs lors de l'expérience précédente ainsi que leurs commentaires. Nous avons noté certaines difficultés de manipulation des interfaces liées au fait qu'il est difficile de visuellement évaluer la distance et la position du doigt (le pointeur virtuel) par rapport à la surface d'un panneau de dialogue ou d'une de ces composantes. Nous avons donc créé la rétroaction visuelle du système de visée avec comme objectif de permettre à l'utilisateur de pouvoir explicitement visualiser la position et la distance relative de son doigt par rapport aux IHM.

L'utilisation de l'ombre fut motivée par des commentaires des sujets lors de l'expérience précédente portant sur les repères. Certains sujets ont fait la remarque qu'une ombre de la main pourrait ajouter un degré de réalisme aux manipulations d'interfaces. L'autre motivation était d'introduire une rétroaction visuelle dite « naturelle » comme nous en avons déjà discuté dans les chapitres précédents. La couleur et le système de visée sont effectivement tous deux des rétroactions dites « non naturelles » car elles ne tentent pas de représenter des métaphores connues de l'utilisateur. Le fait de combiner des rétroactions naturelles et non naturelles nous permet d'évaluer si l'une ou l'autre de ces approches est préférable et s'il y a un impact sur les performances.

5.1.2 Changement de couleur

Le changement de couleur consiste à modifier la couleur d'un élément d'interface selon des règles définies et ayant pour but d'informer l'utilisateur d'un changement d'état de l'IHM en réponse à une action de l'utilisateur. La figure 5.1 illustre l'utilisation du changement de couleur sur un élément d'interface.

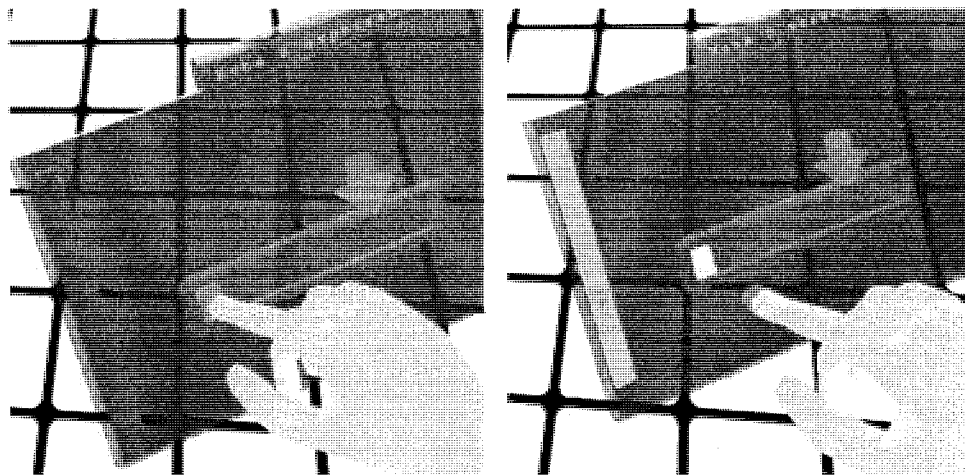


Figure 5.1 : Rétroaction visuelle du changement de couleur

Le tableau 5.1 donne les trois couleurs que nous avons utilisées ainsi que l'interprétation pour chaque changement de couleur :

Tableau 5.1 : États possibles pour le changement de couleur

Couleur	État de l'IHM correspondant
Couleur originale (gris)	Pointeur trop loin pour être dans la zone de l'élément d'interface
Jaune	Pointeur dans la zone de proximité de l'élément d'interface mais ne le touchant pas
Vert	Le pointeur touche l'élément d'interface

Pour définir le comportement de rétroactions basées sur la couleur, nous avons considéré les recommandations en vigueur pour les IHM conventionnelles dans le domaine du 2D. Aaron Marcus (Aaron Marcus 1997) donne une liste de recommandations sur le design

d'IHM 2D. Il présente une série de recommandations relatives à l'utilisation des couleurs dont en voici un résumé :

Les changements de couleur doivent :

- mettre en avant-plan l'importance de l'information;
- identifier des structures ou systèmes;
- illustrer la progression dans le temps;
- réduire l'erreur d'interprétation;
- accroître la clarté et la compréhension.

Il recommande les points suivants :

- utiliser un code de couleurs consistant;
- utiliser un maximum de 7 couleurs lorsqu'un sens à chacun doit être mémorisé et retenu;
- utiliser la séquence spectrale (rouge → orange → jaune → vert → bleu → violet);
- utiliser des valeurs de contrastes et de chrominances forts;
- utiliser des couleurs plus claires pour indiquer des dangers;
- ne pas faire un usage abusif des couleurs trop claires.

Nous avons donc utilisé une séquence de couleurs partant du rouge vers le vert. La couleur rouge n'a pas été utilisée pour l'état neutre du curseur. Nous avons plutôt utilisé la couleur originale de l'objet, ce qui est plus logique d'un point de vue pratique. En effet, lorsque le pointeur virtuel (la main) est trop loin pour être dans la zone proximale d'un élément d'interface, il est inutile de modifier la couleur d'un élément d'interface. Cela pourrait même porter à confusion dans le cas où plusieurs panneaux de dialogue sont actifs et visibles simultanément dans la scène. Nous utilisons ici deux autres principes de base des IHM 2D qui sont de garder l'interface la plus simple possible et

d'utiliser le rouge pour dénoter des conditions de danger. On ne présente donc pas d'information supplémentaire (pas de changement de couleur) lorsque l'élément d'interface n'est pas sollicité ou concerné. De plus, dans le cas où le pointeur est loin d'un élément d'interface, il n'y a pas de condition de danger. Par contre, lorsque le pointeur virtuel s'approche suffisamment d'un élément d'interface, celui-ci passe au jaune pour attirer l'attention de l'utilisateur sur le fait qu'il est sur le point de toucher physiquement cet élément. Ceci concorde bien avec le concept que le jaune indique souvent une condition de mise en garde. Le passage au vert indique naturellement à l'utilisateur qu'il a réussi à toucher l'élément. Nous utilisons donc ici la métaphore des feux de signalisation routière où le rouge indique un état d'arrêt, le jaune un état de mise en garde temporaire et le vert, un état où une action est permise. Il est donc intuitif pour l'utilisateur de retenir le sens attribué à chacune de ces couleurs suivant l'état de la manipulation d'une interface.

Ces trois états permettent à l'utilisateur de visuellement déterminer si son doigt est trop loin d'un élément d'interface donné (couleur originale), s'il s'en approche et s'il est bien positionné pour l'atteindre (jaune) et finalement, s'il touche l'élément d'interface (vert). La logique définissant de quelle manière les changements de couleur sont effectués repose sur un algorithme codé dans le logiciel. Dans le cadre de notre expérience, le changement de couleur se faisait suivant une région dans l'espace formant un rectangle allongé selon l'axe s'éloignant perpendiculairement du panneau de dialogue, c.-à-d. se prolongeant devant le curseur dans ce cas précis. Ceci permet à l'utilisateur d'effectuer une approche vers l'IHM où le doigt reste aligné précisément suivant les axes parallèles au plan du panneau de dialogue (les axes X et Y) tout en se concentrant sur son approche uniquement en fonction de la distance qui sépare son doigt (le pointeur) du plan du panneau de dialogue (l'axe Z). La prochaine rétroaction visuelle, le système de visée, reprend ce concept d'une manière plus explicite et plus visuelle.

5.1.3 Système de visée

Le système de visée est une rétroaction visuelle que nous avons conçue et mise au point suite aux observations faites lors de l'expérience 1 décrite dans une section précédente.

Le design de cette rétroaction a été basé sur les aspects suivants :

- la rétroaction doit être visuelle;
- elle doit fournir des informations supplémentaires (non redondantes);
- elle doit donner une information sur la position spatiale (en X, Y et Z) du doigt de l'utilisateur par rapport au panneau de dialogue ou à un élément d'interface;
- elle doit donner une solution visuelle de l'équation décrivant la position du doigt de l'utilisateur par rapport à l'élément d'interface de manière à visualiser la variable « distance »;

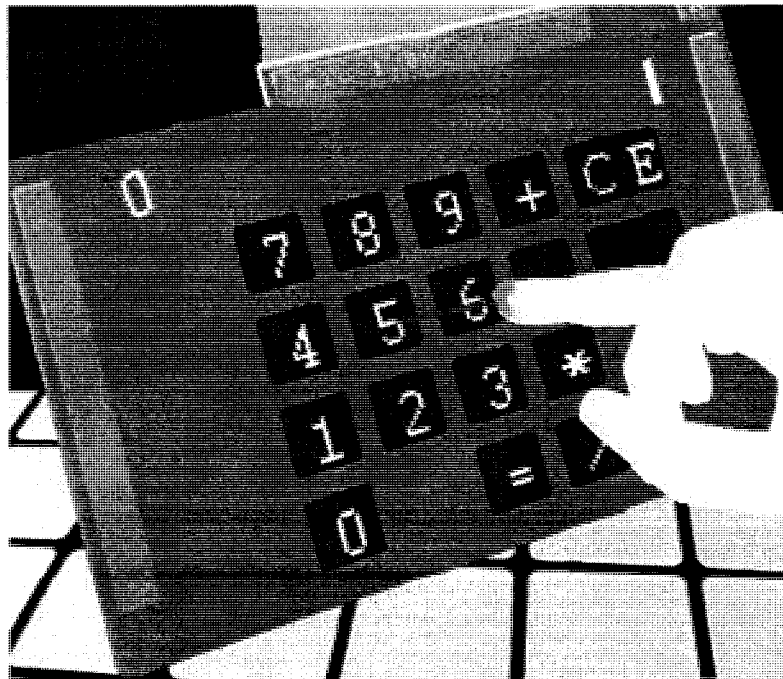


Figure 5.2 : Rétroaction visuelle du système de visée (version 1)

Nous en sommes arrivés à la version 1 du design du système de visée qui consiste à

visuellement tracer une droite entre le bout du doigt de l'utilisateur (le pointeur virtuel) et l'élément d'interface. La droite est affichée de manière à être toujours perpendiculaire à la surface du panneau de dialogue ou de l'élément d'interface. Cette droite fournit une solution visuelle au problème du positionnement pointeur / IHM en illustrant explicitement la distance séparant ces deux derniers ainsi que l'alignement actuel du doigt par rapport à la cible, l'élément d'IHM. Ceci permet à l'utilisateur de rapidement converger vers cette cible en déplaçant son doigt de façon à aligner la droite pour qu'elle touche à la cible désirée. La figure 5.2 illustre l'utilisation du système de visée sur un élément d'interface.

5.1.4 Ombres projetées

La rétroaction visuelle de l'ombre projetée consiste à projeter une ombre de la main virtuelle représentant le pointeur permettant l'interaction avec l'IHM. En principe, la position de l'ombre sur la surface du panneau de dialogue permet à l'utilisateur d'estimer la distance entre la main et cette surface. La rétroaction de l'ombre est différente des deux autres rétroactions en ce sens qu'elle est la seule tentant de reproduire une situation naturelle pour l'utilisateur. L'hypothèse que nous formulons ici est que cette forme de rétroaction est plus intuitive (c.-à-d. plus facile d'utilisation) car elle fait appel à des connaissances acquises de l'utilisateur. Nous nous attendons donc à voir des temps de manipulations inférieurs lorsque l'ombre est active. La figure 5.3 illustre cette rétroaction visuelle.

L'ombre était modélisée de manière à apparaître sur la surface suivant un angle formé par la main virtuelle et une source lumineuse positionnée suivant un certain angle au-dessus de la tête de l'utilisateur. La dimension de l'ombre projetée sur la surface du panneau de dialogue était proportionnelle à la distance séparant la main de cette surface. Lorsque la main s'éloignait de la surface, les dimensions de l'ombre augmentaient et vice-versa. L'ombre projetée était semi-transparente et d'opacité constante telle que montrée à la figure 5.3.

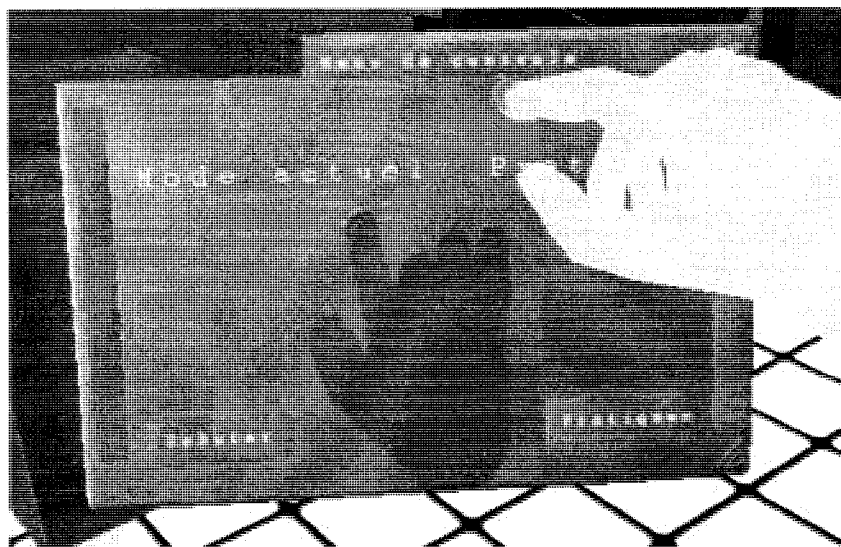


Figure 5.3 : Rétroaction visuelle de l'ombre projetée (version 1)

5.2 Méthodologie

Dans cette section, nous allons décrire la méthodologie suivie au cours de l'expérience menée avec les sujets humains. Nous donnerons également une description de la tâche à effectuer, des sujets humains ainsi que de la procédure utilisée.

5.2.1 La plateforme d'expérience

Pour être en mesure d'évaluer les performances de l'utilisateur en fonction du type de rétroaction utilisé, nous avons utilisé la plateforme de tests RV développée pour l'expérience 1 en y apportant quelques modifications. Le lecteur est invité à revoir les chapitres précédents pour plus de détails concernant la description de la plateforme de test RV. Les modifications apportées à la plateforme utilisée lors de la première expérience concernent le panneau de dialogue principal sur lequel les sujets effectuent les diverses manipulations. Ces modifications ont consisté à changer le comportement des éléments d'interface présentés sur ce menu en fonction de la tâche de l'expérience 2 qui diffère de l'expérience 1. Nous avons gardé le gradateur linéaire mais avons ajouté

deux rétroactions visuelles qui n'étaient pas présentes lors de l'expérience 1. Il s'agit des rétroactions du système de visée et de l'ombre.

Concernant les repères, nous avons utilisé le repère numéro 2, c.-à-d. celui où le panneau de dialogue est attaché selon la position mais pas la rotation du corps de l'utilisateur. Ce choix a été motivé par des aspects d'ordre pratique. Comme le sujet devait rester debout, nous voulions limiter les impacts sur la position des IHM relatifs aux fluctuations de position du corps du sujet. Le repère 2 permet une calibration initiale aisée du système concernant le positionnement des menus par rapport à l'utilisateur et ainsi, une utilisation plus facile pour les sujets. L'utilisation d'un repère plutôt qu'un autre n'affecte pas les conclusions de l'expérience 2 car nous n'avons utilisé qu'un seul repère pour l'ensemble de nos mesures. Cela fait en sorte que la performance reliée au repère lui-même reste égale pour tous les essais effectués et n'avantage donc pas certains essais au détriment des autres. Dans l'expérience 2, le seul impact relié au repère utilisé porte sur le niveau de confort des sujets. Comme nous le mentionnions, le repère devait être choisi de manière à éviter des tensions musculaires prononcées comme c'est le cas du repère 5. À ce point de vue, le repère 2 représente un niveau de confort optimal.

5.2.2 La tâche

Dans cette expérience, nous demandions au sujet de déplacer un curseur sur un gradateur linéaire de sa position de départ vers une position d'arrivée marquée par une flèche verte sur l'interface du panneau de dialogue. La position de départ du curseur était toujours la même, soit à l'extrémité gauche du gradateur. La position de la flèche était également fixe sur le panneau de dialogue, tout au long de l'expérience. La distance à parcourir était donc elle aussi constante d'un essai à un autre. La figure 5.4 illustre la manipulation à effectuer.

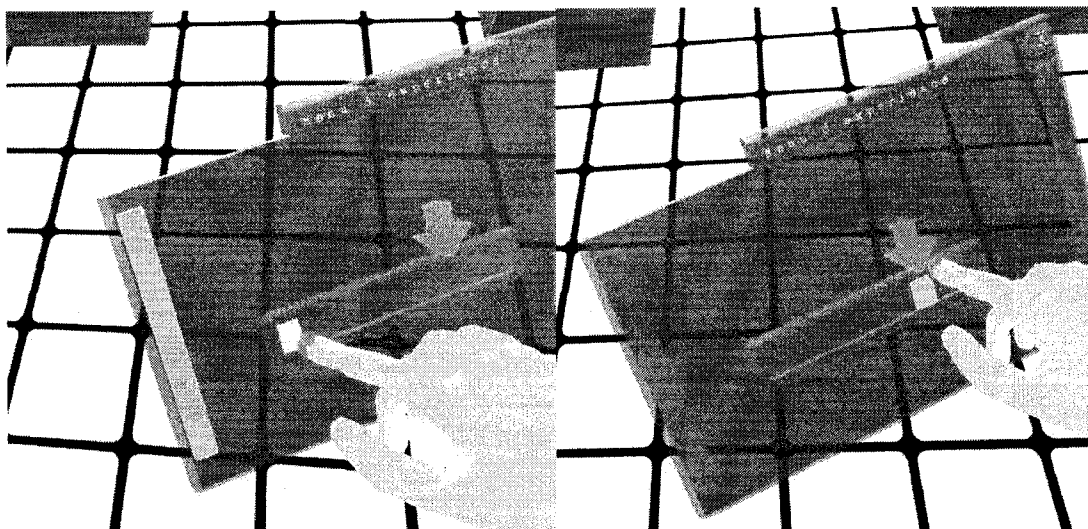


Figure 5.4 : Tâche de l'expérience 2

Nous demandions au sujet d'effectuer le mouvement le plus rapidement possible, tout en relâchant le curseur le plus précisément possible vis-à-vis le centre de la flèche. La position du curseur était remise à son point de départ à l'extrême gauche de la section de coulisement au début de chaque nouvel essai. Le sujet n'avait aucune limite de temps imposée pour effectuer la manipulation. Contrairement à l'expérience 1, nous n'imposons pas de zone de relâchement pour indiquer la fin d'un essai. La fin de chaque essai était uniquement déterminée par le relâchement du curseur, peu importe sa position finale par rapport à la flèche verte. Ce changement a été apporté dans le but de mesurer le facteur erreur de positionnement, sans imposer de contraintes. Le chronométrage de l'essai prenait fin lorsque le curseur était relâché, c.-à-d. lorsque le doigt sortait de la zone sensible du curseur. Ce changement d'état était visible par le passage de la couleur du curseur de jaune à grisé lorsque cette rétroaction était active.

5.2.3 Les sujets

Quinze sujets, composés de 9 hommes et de 6 femmes, ont participé à l'expérience. L'âge moyen était de 27 ans, couvrant une plage allant de 18 à 60 ans. Les sujets devaient minimalement avoir 18 ans, être droitiers et être en mesure de percevoir

correctement les couleurs. Le prérequis exigeant d'être droitier découle de considérations d'ordre technique. Nos menus ont effectivement été conçus pour une utilisation par des droitiers. Pour nos tests, nous n'étions pas intéressés par les différences entre des sujets droitiers et gauchers. L'inclusion de ceux-ci dans les tests aurait exigé une adaptation de l'ensemble de notre plateforme de test afin de pouvoir gérer ce cas. Le second prérequis concernant la vision correcte des couleurs vient essentiellement du fait que l'environnement virtuel utilise des changements de couleur de certains éléments d'interface. Il est donc nécessaire pour un individu de bien percevoir ces nuances de couleurs afin de pouvoir effectuer les divers tests demandés. Nous faisons une vérification en début d'expérience avec le sujet à l'aide du casque de visualisation qui présentait des éléments d'interfaces ayant des couleurs différentes.

Sept des 15 sujets avaient déjà participé à l'expérience 1. Les autres sujets avaient peu ou pas d'expérience dans l'utilisation de systèmes de réalité virtuelle. Les sujets ayant répondu à notre appel à la participation ont été convoqués à tour de rôle sur une période d'une semaine, au rythme d'un sujet à l'heure. Un seul sujet était présent à un moment donné dans notre laboratoire d'expérimentation.

Comme pour les expériences passées, les sujets étaient payés au taux de 10\$ par heure. Ils devaient remplir le formulaire de consentement qui est donné à l'annexe 1.

5.2.4 Procédure

Au début de la séance d'expérience, chaque sujet devait compléter un court questionnaire au sujet de son âge, de son genre et de son niveau d'expérience avec les systèmes informatiques en général ainsi que les systèmes RV. Les détails de ce questionnaire sont donnés à l'annexe 2. Par la suite, une brève présentation de la plateforme de tests RV était faite en deux étapes. En premier lieu, l'auteur de cette thèse plaçait le matériel RV sur lui, présentait au sujet le fonctionnement général de l'environnement RV et donnait des recommandations sur la façon d'effectuer les

manipulations avec l'interface présentée. Nous expliquions au sujet comment bouger la main à proximité des panneaux de dialogue et comment effectuer l'approche finale vers les contrôles avec sa main, en passant devant le menu. Nous mentionnions au sujet de garder le bras allongé le long du corps après avoir appuyé sur le bouton « démarrer » et d'attendre que l'autre panneau de dialogue apparaisse. Nous lui demandions par la suite de faire une approche avec sa main droite (le pointeur) de manière à passer systématiquement devant le panneau de dialogue. Cela permettait d'assurer une constance dans les mouvements effectués juste avant que le chronométrage de l'expérience ne démarre.

La durée de cette introduction était d'environ cinq minutes. En second lieu, le sujet prenait place à son tour et plaçait l'équipement RV sur lui pour pouvoir pratiquer chaque manipulation de l'expérience durant une période de cinq minutes. Nous avons déterminé, par des essais préliminaires que nous avons nous-mêmes effectués avec le SRV, la durée du temps d'entraînement de manière à permettre à chaque sujet d'acquérir un confort et une aisance minimale avec la manipulation des interfaces. Aucune mesure n'était prise durant la période de pratique.

Encore ici, nous demandions au sujet de rester debout tout au long de l'expérience pour les mêmes raisons explicitées au chapitre précédent.

Une fois la période de pratique terminée, le sujet prenait une courte pause durant laquelle nous l'informions du fait que les essais subséquents seraient mesurés. La durée de l'expérience fut de 45 minutes en moyenne, sans considérer la période d'introduction et de pratique. Les essais effectués par chaque sujet étaient regroupés en huit blocs de 20 essais, pour un total de 160 essais. Chacun de ces huit blocs représentait un des huit cas de rétroactions visuelles différentes évaluées dans cette expérience. À la fin de chaque bloc d'essais, nous demandions au sujet de nous donner ses impressions. Nous lui demandions de comparer le cas présent avec celui du bloc précédent et de nous indiquer ses préférences. Toute autre remarque était notée et consignée au registre à la main par

l'auteur de cette thèse. Le tableau 5.2 donne les huit combinaisons que nous avons utilisées pour définir les huit cas de l'expérience 2.

Tableau 5.2 : Les 8 cas de rétroactions visuelles

Cas	Couleur	Système de visée	Ombre
1	sans	sans	sans
2	sans	sans	avec
3	sans	avec	sans
4	sans	avec	avec
5	avec	sans	sans
6	avec	sans	avec
7	avec	avec	sans
8	avec	avec	avec

Au cours de l'expérience, nous avons noté par écrit les commentaires faits par chaque sujet. Nous avons également évalué la satisfaction du sujet à l'aide des questions du questionnaire proposé en fin d'expérience comme précédemment mentionné. Les données recueillies par l'entremise de ce questionnaire portent sur les facteurs suivants :

- Satisfaction
 - Préférences concernant les rétroactions visuelles utilisées
- Fatigue
 - Échelle de Likert à 5 niveaux
 - Nulle (imperceptible)
 - Faible (au seuil de la perception)
 - Moyenne (équivalente à une activité de durée similaire)
 - Forte (difficultés de concentration)
 - Très élevée (causant des douleurs).
- Inconfort physiologique
 - Sensation de désorientation (absente / présente)
 - Sensation de nausées (absente / présente)

- Maux de tête (absents / présents)
- Troubles de la vue (absents / présents)
- Autres remarques formulées par le sujet (champ du questionnaire « commentaires » en style libre)

L'annexe 2 montre le questionnaire utilisé lors de l'expérience.

L'expérience a été conçue de manière à limiter la fatigue des sujets. Pour ce faire, l'interface de la plateforme RV permettait au sujet de choisir lui-même à quel moment chaque essai débutait en requérant de celui-ci qu'il appuie sur un bouton du panneau de dialogue de contrôle de l'expérience. Le sujet pouvait donc effectuer une courte pause entre chaque bloc d'essais. Par ailleurs, les mesures prises ont permis de tracer des courbes d'apprentissage qui peuvent être utilisées afin de déceler l'apparition de fatigue chez le sujet.

5.2.5 Variables de l'expérience

Dans cette expérience, nous avons mesuré le temps d'exécution de la tâche et l'erreur de positionnement, c.-à-d. l'écart de position du curseur entre la position idéale et la position au moment où l'utilisateur a relâché le curseur. Le tableau 5.3 donne un résumé des variables de l'expérience 2.

Tableau 5.3 : Variables de l'expérience 2

Indépendante	Dépendante
1) couleur (P)	1) temps d'essai
2) système de visée (P)	2) temps d'acquisition
3) ombrage (P)	3) temps de sélection
4) genre du sujet (S)	4) temps de manipulation
	5) erreur de positionnement

Les principales variables indépendantes mesurées sont l'utilisation de la couleur, du système de visée et de l'ombrage (indiqué par un P dans le tableau 5.3). Le genre du sujet a été considéré comme une variable indépendante secondaire (indiqué par un S dans le tableau 5.3), c.-à-d. une variable n'étant pas de l'intérêt principal de l'expérience dont l'existence est connue et qui doit être prise en compte étant donné l'impact qu'elle peut avoir sur les résultats.

Le temps d'essai comprend l'intervalle de temps débutant au moment où la main de l'utilisateur entre dans la zone active du panneau de dialogue et se terminant au moment où le curseur est relâché. Cette zone forme un volume cubique invisible autour du menu. Ce volume était de dimensions fixes d'un essai à l'autre, permettant de s'assurer que pour chaque essai, les temps mesurés étaient effectués sur une même base de référence indépendante de la distance initiale entre le sujet et le menu. Le volume avait les dimensions suivantes : 30 cm (largeur) x 20 cm (hauteur) x 7,5 cm (profondeur). La base de ce volume repose sur le plan de la surface du panneau de dialogue et s'étend 7,5 cm devant celui-ci. Comme la distance à parcourir n'est que de 7,5 cm avant d'atteindre le curseur, nous éliminions ainsi tout temps relatif au parcours de la main avant d'arriver à proximité du menu. La position initiale de la main de l'utilisateur dans l'espace n'avait donc pas d'incidence sur les temps mesurés.

Le temps d'acquisition est l'intervalle de temps entre le moment où la main de l'utilisateur entre dans la zone active du menu et celui où le doigt est aligné de manière à activer la zone de proximité du curseur. Cette zone forme un rectangle invisible englobant le curseur et se prolongeant devant celui-ci sur une distance de 4 cm. Lorsque le changement de couleur était actif, la couleur du curseur passait au jaune lorsque le doigt se trouvait dans cette zone. La Figure 5.5 illustre cette zone qui a été rendue visible pour les besoins de la démonstration.

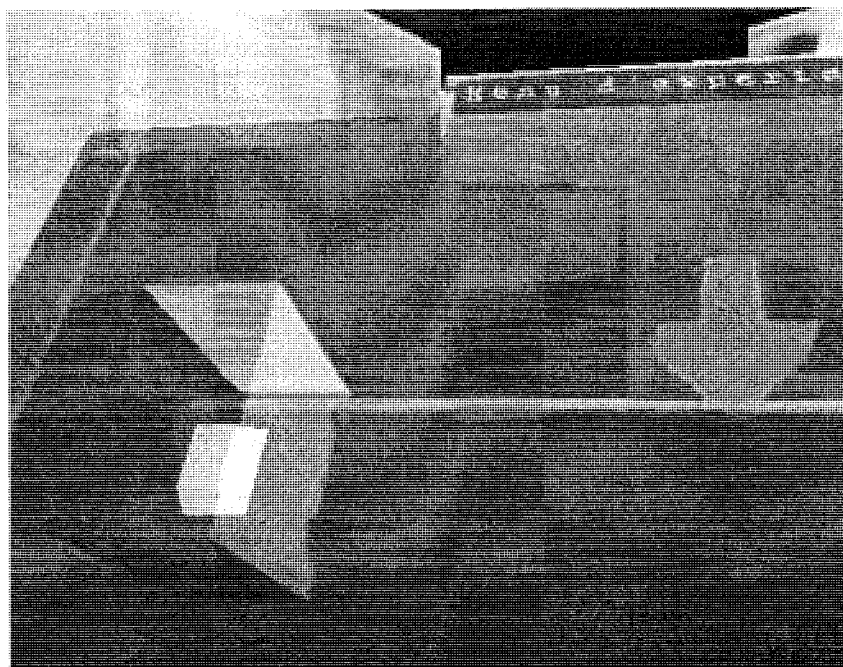


Figure 5.5 : Zone de détection d'acquisition du curseur

Le temps de sélection comprend l'intervalle débutant au moment où la main de l'utilisateur entre dans la zone active du menu et se terminant au moment où le doigt touche le curseur. Lorsque le changement de couleur était actif, la couleur du curseur passait au vert lorsque le doigt se trouvait en contact avec le curseur.

Le temps de manipulation comprend l'intervalle de temps débutant au moment où l'utilisateur touche le curseur et se terminant au moment où celui-ci est relâché. En d'autres termes, c'est le temps requis pour placer le curseur en position vis-à-vis la cible et relâcher le curseur. Un algorithme de détection de collision permettait de détecter cette condition.

L'erreur de positionnement est obtenue en calculant la différence entre la position de la flèche verte marquant la position de relâchement visée et la position où le curseur est réellement relâché. On considère que le curseur est relâché lorsque le doigt du sujet sort du volume de collision du curseur. Les dimensions de ce volume de collision sont de 2

cm de part et d'autre du centre du curseur, suivant chacun des trois axes X, Y et Z.

Pour chacune de ces variables, nous cherchons à obtenir les valeurs les plus faibles car elles décrivent les meilleures performances possibles, soit : 1) la plus grande rapidité et 2) la plus grande précision possible.

5.2.6 Le protocole expérimental

Le tableau 5.4 présente le sommaire du protocole expérimental pour l'expérience 2. On y trouve le nombre de variables indépendantes utilisées, le nombre de valeurs possibles pour chacune d'elles ainsi que le nombre de cas considérés pour le plan expérimental utilisé.

Tableau 5.4 : Sommaire du plan expérimental de l'expérience 2

Étude expérimentale	Nombre de variables indépendantes primaires	Nombre de variables secondaires	Nombre de cas	Répétitions pour chaque cas	Nombre total d'essais par sujet	Durée approximative par sujet (minutes)	Nombre de sujets
Effet des rétroactions visuelles sur les performances	3	1	8	20	160	45	15

L'ordre d'apparition des huit cas d'expérience présentés aux sujets a été randomisé de manière à contrebalancer les effets d'apprentissage de chaque sujet d'un essai à l'autre.

L'ordre des cas utilisé est donné au tableau 5.5 :

Tableau 5.5 : Ordre des cas pour l'expérience 2

Sujet	Ordre des cas							
1	7	3	5	2	0	6	1	4
2	1	0	7	6	5	4	2	3
3	1	6	0	5	2	3	7	4
4	6	5	2	3	7	4	1	0
5	1	3	6	7	0	4	2	5
6	3	4	2	7	1	6	5	0
7	6	1	4	0	2	7	5	3
8	4	7	0	1	5	3	6	2
9	3	4	5	7	1	0	6	2
10	1	4	0	5	3	2	7	6
11	2	4	7	5	3	1	0	6
12	0	1	2	3	4	5	6	7
13	7	3	5	2	0	6	1	4
14	1	0	7	6	5	4	2	3
15	1	6	0	5	2	3	7	4

5.3 Résultats

5.3.1 Données empiriques mesurées et statistiques descriptives

Les tableaux suivants donnent les résultats obtenus pour chaque variable indépendante mesurée. On y liste les valeurs moyennes, les erreurs standards ainsi que les écarts-types de déviation à plus ou moins 5%. Les résultats ont été triés par ordre croissant suivant la moyenne de la variable principale afin de mettre en évidence l'ordre optimal des cas présentés en terme de performances. Le nombre N indique le nombre de données (mesures) utilisées pour chaque cas.

Les variables indépendantes considérées sont les trois rétroactions visuelles utilisées qui étaient soit activées ou désactivées, ainsi que le genre des sujets. Les cinq tableaux suivants donnent les résultats observés pour les variables dépendantes de temps d'essai moyen, temps de sélection moyen, temps de déplacement moyen et d'erreur de positionnement.

Dans les tableaux qui vont suivre, un 0 indique que la rétroaction visuelle n'était pas activée, alors qu'un 1 indique qu'elle était active lors de l'essai.

Tableau 5.6 : Effet des trois rétroactions visuelles sur les temps d'essais moyens (secondes)

Couleur	Cubique	Ombre	Moyenne	Erreur std.	-95%	+95%	N
1	0	0	4,22	0,24	3,75	4,69	15
1	1	0	4,30	0,24	3,84	4,77	15
1	0	1	4,35	0,24	3,88	4,82	15
0	1	1	4,39	0,24	3,92	4,86	15
0	0	0	4,45	0,24	3,98	4,92	15
0	0	1	4,50	0,24	4,04	4,97	15
0	1	0	4,64	0,24	4,17	5,11	15
1	1	1	4,71	0,24	4,24	5,18	15

Pour le temps d'essai moyen, le changement de couleur des éléments d'interface semble être le facteur dominant d'accroissement de performance. La rétroaction du système de visée suit en second mais ne se distingue pas fortement de l'ombre. Il est intéressant de noter ici que le pire cas n'est pas l'absence de toute rétroaction (cas où les trois rétroactions sont à 0 à mi-chemin dans le tableau 5.6). Le pire cas est au contraire situé à l'autre extrême où toutes les rétroactions sont actives. Ceci vient confirmer des observations faites lors de la première expérience où l'on a noté des impacts négatifs sur les performances dus à une surcharge d'information pour l'utilisateur.

Le tableau 5.7 donne les moyennes de temps d'acquisition du curseur. Comme les chiffres l'indiquent, les différences sont minimales, allant de 1.21 à 1.41 seconde. On remarque que la seule variable qui semble être clairement bénéfique pour ce facteur est la couleur. L'effet sur les performances du système de visée est principalement négatif alors que l'ombre reste indéterminée ayant une répartition aléatoire.

Tableau 5.7 : Effet des trois rétroactions visuelles sur les temps d'acquisition moyens (secondes)

Couleur	Cubique	Ombre	Moyenne	Erreur std.	-95%	+95%	N
1	1	0	1,21	0,09	1,03	1,39	15
1	0	1	1,23	0,09	1,05	1,40	15
1	0	0	1,24	0,09	1,06	1,42	15
0	0	1	1,24	0,09	1,06	1,42	15
0	0	0	1,31	0,09	1,13	1,49	15
0	1	0	1,34	0,09	1,16	1,52	15
0	1	1	1,36	0,09	1,18	1,54	15
1	1	1	1,41	0,09	1,23	1,59	15

On observe des résultats similaires pour le temps de sélection moyen mis à part le système de visée qui montre des performances légèrement meilleures. Le tableau 5.8 donne les résultats.

Tableau 5.8 : Effet des trois rétroactions visuelles sur les temps de sélection moyens (secondes)

Couleur	Cubique	Ombre	Moyenne	Erreur std.	-95%	+95%	N
1	0	0	2,02	0,17	1,68	2,37	15
1	1	0	2,07	0,17	1,73	2,42	15
0	1	1	2,11	0,17	1,77	2,45	15
1	0	1	2,21	0,17	1,87	2,56	15
0	0	1	2,23	0,17	1,89	2,57	15
0	0	0	2,29	0,17	1,94	2,63	15
1	1	1	2,29	0,17	1,95	2,64	15
0	1	0	2,39	0,17	2,05	2,73	15

Les résultats pour le temps de déplacement moyen sont surprenants car le second meilleur temps est celui où aucune rétroaction n'est active et le pire temps est celui où les trois rétroactions sont actives. En observant les trois premières colonnes du tableau 5.9, on ne voit aucune tendance pour les trois variables indépendantes qui semblent réparties plus ou moins uniformément sur l'ensemble des huit positions. Les performances pour la tâche de déplacement semblent donc peu bénéficier des aides visuelles. Ce constat est en fait logique car dans le cas de la sous-tâche de déplacement du curseur, le doigt est placé de sorte qu'il cache le curseur. Dans ce cas, ni le système de visée, ni la couleur du curseur ne sont visibles. Il ne reste donc que l'ombre de la

main qui reste visible dans cette situation, ce qui tend à expliquer la meilleure performance de l'ombre pour cette sous-tâche.

Tableau 5.9 : Effet des trois rétroactions visuelles sur les temps de déplacement moyens (secondes)

Couleur	Cubique	Ombre	Moyenne	Erreur std.	-95%	+95%	N
1	0	1	2,14	0,12	1,90	2,38	15
0	0	0	2,16	0,12	1,93	2,40	15
0	1	1	2,28	0,12	2,04	2,52	15
0	1	0	2,25	0,12	2,01	2,49	15
1	0	0	2,20	0,12	1,96	2,44	15
0	0	1	2,27	0,12	2,03	2,51	15
1	1	0	2,23	0,12	1,99	2,47	15
1	1	1	2,42	0,12	2,18	2,66	15

Finalement, pour ce qui est de l'erreur de positionnement, l'ombre semble être la rétroaction la plus bénéfique pour les performances, suivi du système de visée et de la couleur. Ce résultat est conforme à nos attentes car les rétroactions offrant le plus d'informations sur le positionnement sont effectivement l'ombre et le système de visée. Le changement de couleur ne donne pas d'information visuelle sur la position exacte du doigt de l'utilisateur mais plutôt une indication discrète sur la proximité à une zone (un volume) donnée. Le tableau 5.10 montre ces résultats.

Tableau 5.10 : Effet des trois rétroactions visuelles sur l'erreur de positionnement moyenne (centimètres)

Couleur	Cubique	Ombre	Moyenne	Erreur std.	-95%	+95%	N
1	1	1	3,92	1,31	1,32	6,52	15
0	0	1	4,98	1,31	2,38	7,58	15
1	1	0	5,09	1,31	2,48	7,69	15
0	1	0	5,78	1,31	3,18	8,38	15
1	0	1	6,05	1,31	3,45	8,65	15
0	0	0	6,82	1,31	4,22	9,42	15
0	1	1	6,96	1,31	4,36	9,56	15
1	0	0	7,66	1,31	5,06	10,26	15

Pour cette expérience, l'impact sur la performance semble donc être principalement situé au niveau de la précision de manipulation qui est grandement affectée par la présence ou

l'absence des trois rétroactions visuelles. Contrairement à ce qui a été observé pour les temps de manipulation, ici la performance augmente lorsqu'on utilise simultanément plusieurs rétroactions visuelles.

Du côté des augmentations de performance, on obtient les résultats globaux suivants. La différence des temps d'essai moyens est de 10.4%. Cette différence est de 15.5% pour le temps de sélection moyen et de 11.6% pour le temps de déplacement moyen. On observe une augmentation de performance de 49.4% pour ce qui est de l'erreur de positionnement! On parle donc d'un gain de performance potentiel majeur pour ce qui est de la précision de manipulation d'IHM pour SRV selon le type de rétroaction visuelle utilisé.

La deuxième variable indépendante considérée est le genre des sujets. Les quatre tableaux suivants donnent les résultats obtenus.

Tableau 5.11 : Effet du genre sur le temps d'essais moyen (secondes)

genre	Moyenne	Erreur std.	-95%	+95%	N
M	4,12	0,10	3,92	4,32	72
F	4,77	0,12	4,53	5,02	48

Tableau 5.12 : Effet du genre sur le temps de sélection moyen (secondes)

genre	Moyenne	Erreur std.	-95%	+95%	N
M	2,16	0,08	2,01	2,31	72
F	2,24	0,09	2,06	2,43	48

Tableau 5.13 : Effet du genre sur le temps de déplacement moyen (secondes)

genre	Moyenne	Erreur std.	-95%	+95%	N
M	1,96	0,05	1,86	2,06	72
F	2,53	0,06	2,41	2,66	48

Dans le cas de la variable indépendante correspondant au genre du sujet, on note une concordance des résultats de performance pour les variables dépendantes relatives au

temps. De manière générale, les hommes sont plus rapides que les femmes.

Si on regarde l'erreur de positionnement, on voit que les femmes sont plus performantes que les hommes cette fois-ci. La précision de manipulation chez celles-ci est plus grande. Il semble donc y avoir un effet balancier entre le temps de manipulation et la précision en fonction du genre. Cela vient encore ici confirmer que la loi de Fitts s'applique dans le cas des IHM RV.

Tableau 5.14 : Effet du genre sur l'erreur de positionnement moyenne (centimètres)

Genre	EPos Moyenne	EPos Erreur std.	EPos -95%	EPos +95%	N
M	6,76	0,58	5,61	7,90	72
F	5,06	0,71	3,66	6,46	48

En termes d'écarts relatifs, on note une différence de 13.6% entre les genres relativement au temps d'essai moyens, ce qui est comparable aux écarts dus aux rétroactions visuelles utilisées.

5.3.2 Analyse de variance

Nous avons effectué une analyse de variance multifactorielle sur les données recueillies. La colonne SS représente la somme des carrés (sum of square). La colonne MS représente les carrés moyens (mean square). La colonne F représente le coefficient de la courbe de distribution de Fisher et p la probabilité que l'effet ne soit pas significatif. Les résultats statistiquement significatifs ($p < 0.05$) ont été marqués en italique gras dans les tableaux d'analyse qui suivent.

En ce qui a trait aux temps d'essai moyens, le seul facteur significatif est le genre du sujet. Dans le cas présent, le nombre de femmes était de 6 (40%) versus 9 (60%) hommes ce qui permet une plus grande certitude quant aux conclusions portant sur le genre que nous pouvons tirer de ces analyses comparativement à celles de l'expérience précédente (voir chapitre 4). Le tableau 5.15 montre les résultats de l'analyse de

variance sur les temps d'essai moyens.

Tableau 5.15 : Analyse de variance des temps d'essai moyens

	SS	MS	F	p
genre	12,326	12,326	15,334	0,000161
Couleur	0,287	0,287	0,357	0,551307
Sys. visée	0,490	0,490	0,610	0,436716
Ombre	0,211	0,211	0,263	0,609097
Genre * Couleur	0,282	0,282	0,351	0,554761
Genre * Sys. visée	0,000	0,000	0,000	0,985529
Couleur * Sys. visée	0,246	0,246	0,306	0,581208
Genre * Ombre	0,228	0,228	0,284	0,595501
Couleur * Ombre	0,964	0,964	1,199	0,275954
Sys. visée * Ombre	0,001	0,001	0,001	0,974905
Genre * Couleur * Sys. visée	0,142	0,142	0,176	0,675299
Genre * Couleur * Ombre	0,040	0,040	0,050	0,824250
Genre * Couleur * Ombre	0,908	0,908	1,129	0,290370
Couleur * Sys. visée * Ombre	0,606	0,606	0,754	0,387119
Genre * Couleur * Sys. visée * Ombre	0,001	0,001	0,002	0,966679
Erreur	83,598	0,804		
Total	100,486			

On ne note aucun résultat significatif du côté des temps d'acquisition et de sélection moyens en ce qui concerne les trois variables indépendantes : couleur, système de visée et ombre. Seul le genre est significatif encore ici. Le tableau 5.16 montre ces résultats.

Tableau 5.16 : Analyse de variance des temps d'acquisition moyens

	SS	MS	F	p
genre	9,4514	9,4514	45,208	0,000000
Couleur	0,0004	0,0004	0,002	0,966948
Sys. visée	0,2983	0,2983	1,427	0,235025
Ombre	0,1314	0,1314	0,629	0,429699
Genre * Couleur	0,0048	0,0048	0,023	0,880461
Genre * Sys. visée	0,0665	0,0665	0,318	0,573994
Couleur * Sys. visée	0,0844	0,0844	0,404	0,526567
Genre * Ombre	0,0143	0,0143	0,069	0,793868
Couleur * Ombre	0,0004	0,0004	0,002	0,963111
Sys. visée * Ombre	0,0536	0,0536	0,256	0,613795
Genre * Couleur * Sys. visée	0,0251	0,0251	0,120	0,729837
Genre * Couleur * Ombre	0,0496	0,0496	0,237	0,627223
Genre * Couleur * Ombre	0,0021	0,0021	0,010	0,920207
Couleur * Sys. visée * Ombre	0,1899	0,1899	0,908	0,342729
Genre * Couleur * Sys. visée * Ombre	0,0308	0,0308	0,147	0,701983
Erreur	21,7427	0,2091		
Total	32,0888			

Pour ce qui est de la précision de manipulation on note une interaction entre les facteurs genre, couleur et ombre. Nous ne pouvons donc pas tirer de conclusions sur l'impact du facteur genre seul, mais cela nous indique qu'il existe un effet sur les performances reliées à la couleur et l'ombre variant en fonction du genre de l'utilisateur.

Tableau 5.17 : Analyse de variance de l'écart de position du curseur

	SS	MS	F	p
Genre	0,001182	0,001182	6,80666	0,010420
Couleur	0,000175	0,000175	1,00926	0,317413
Sys. visée	0,000125	0,000125	0,71983	0,398148
Ombre	0,000112	0,000112	0,64361	0,424236
Genre * Couleur	0,000000	0,000000	0,00019	0,989120
Genre * Sys. visée	0,000001	0,000001	0,00736	0,931811
Couleur * Sys. visée	0,000026	0,000026	0,14904	0,700245
Genre * Ombre	0,000128	0,000128	0,73710	0,392566
Couleur * Ombre	0,000539	0,000539	3,10305	0,081084
Sys. visée * Ombre	0,000167	0,000167	0,95930	0,329636
Genre * Couleur * Sys. visée	0,000085	0,000085	0,49127	0,484925
Genre * Couleur * Ombre	0,000991	0,000991	5,70513	0,018718
Genre * Couleur * Ombre	0,000048	0,000048	0,27643	0,600168
Couleur * Sys. visée * Ombre	0,000202	0,000202	1,16256	0,283430
Genre * Couleur * Sys. visée * Ombre	0,000028	0,000028	0,16390	0,686425
Erreur	0,018065	0,000174		
Total	0,022371			

En résumé, les analyses de variance n'ont révélé aucun effet significatif direct pour les facteurs principaux que sont la couleur, le système de visée et l'ombrage. Le seul facteur s'étant démarqué est le genre du sujet. Nous pouvons donc seulement conclure qu'il y a des variations de performances suivant le genre du sujet.

Un effet combiné entre les facteurs genre, couleur et ombre a été relevé au niveau de la précision de manipulation des éléments d'interface. Les graphiques suivants vont nous permettre de voir dans quelle mesure ces effets interagissent entre eux.

5.3.3 Performances en fonction du changement de couleur des éléments d'interface

Faisant abstraction des autres facteurs, les variations de performances en temps dues aux changements de couleur des éléments d'interface sont minimales comme le montre la figure 5.6.

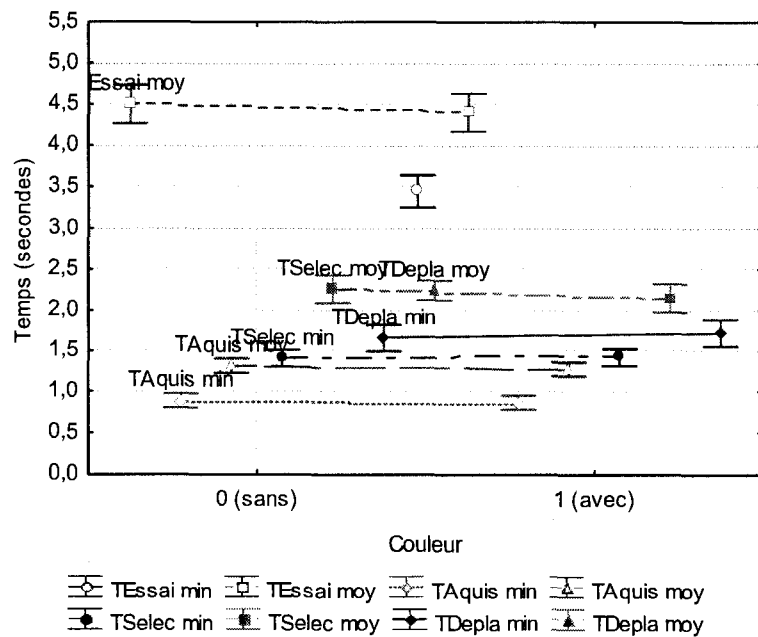


Figure 5.6 : Variation des temps d'essai en fonction du changement de couleur

Dans le cas du temps minimal de déplacement, on observe en fait une dégradation de performance.

En ce qui concerne la précision des manipulations, on observe une augmentation de la précision de manipulation sur l'écart moyen lorsque le changement de couleur est utilisé (valeur à 1). Par contre, on observe l'effet contraire sur l'écart minimum. Les variations restent faibles car elles sont à l'intérieur des barres d'intervalles de confiance. La figure 5.7 illustre ces résultats.

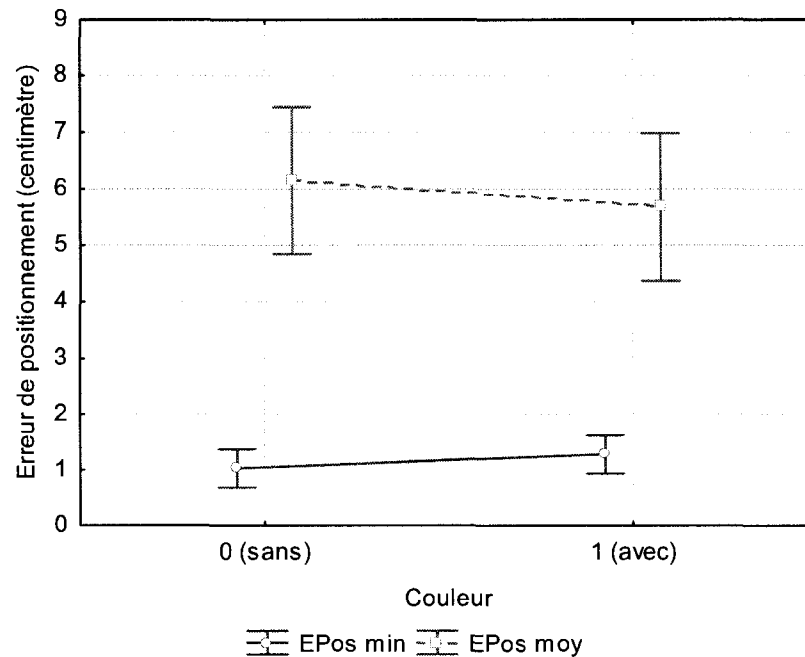


Figure 5.7 : Variation des erreurs de positionnement en fonction du changement de couleur

5.3.4 Performances en fonction de l'utilisation du système de visée

L'utilisation du système de visée n'affecte pas significativement les temps de manipulation. On observe même une tendance de dégradation des performances des temps en général, ce qui est surprenant compte tenu des résultats observés lors de l'expérience 1. La Figure 5.8 illustre ces résultats.

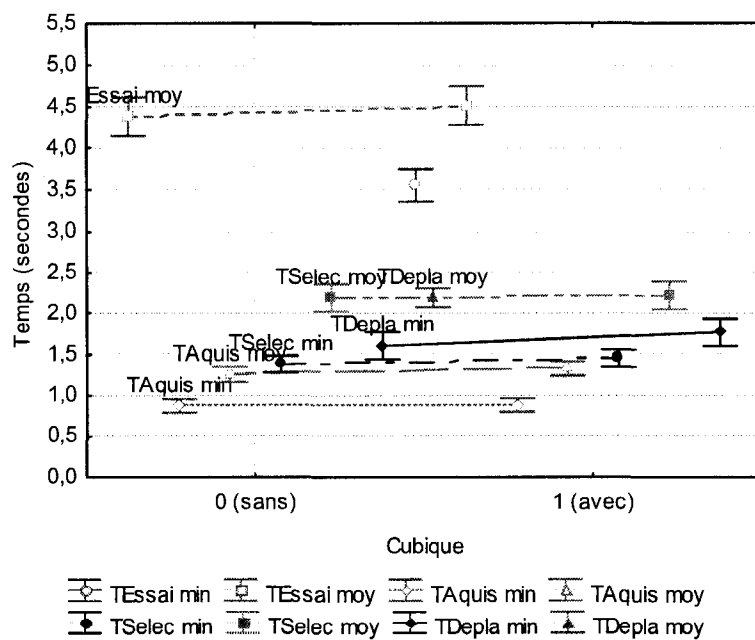


Figure 5.8 : Variation des temps d'essai en fonction de l'utilisation du système de visée

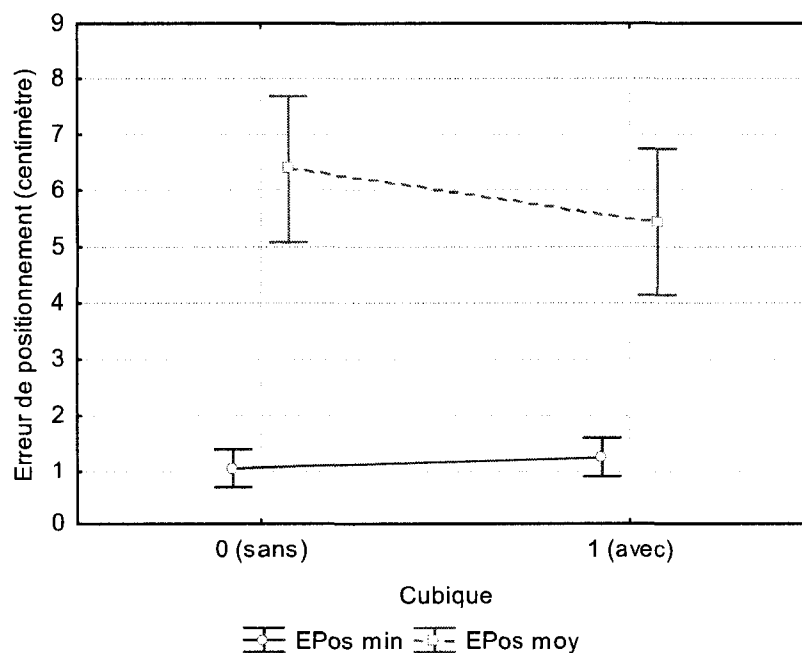


Figure 5.9 : Variation des erreurs de positionnement en fonction de l'utilisation du système de visée

Par contre, on observe un gain au niveau de la précision (écart de position moyen) même si ce gain ne ressort pas comme étant statistiquement significatif. La figure 5.9 illustre ces résultats.

5.3.5 Performances en fonction l'utilisation de l'ombrage

L'ombrage est la rétroaction visuelle qui s'avère offrir le moins d'impacts positifs sur les performances de l'utilisateur, malgré qu'elle soit la plus intuitive et qu'elle se rapproche le plus de la réalité de l'utilisateur. En regardant la figure 5.10, on note un effet négligeable ou négatif sur les performances lorsque l'ombre était présente (valeur à 1).

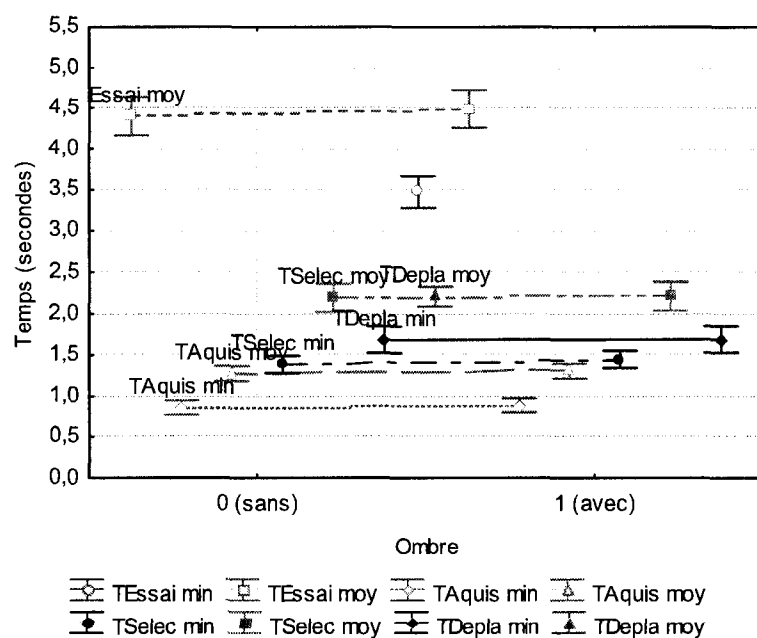


Figure 5.10 : Variation des temps d'essai en fonction de l'utilisation de l'ombrage

Par contre, à la figure 5.11 l'ombre montre une augmentation de performances au niveau de la précision de manipulation, comme ce fut le cas pour la rétroaction du système de visée. Encore ici les variations de performances restent faibles mais on peut constater la tendance d'amélioration des performances sur les graphiques.

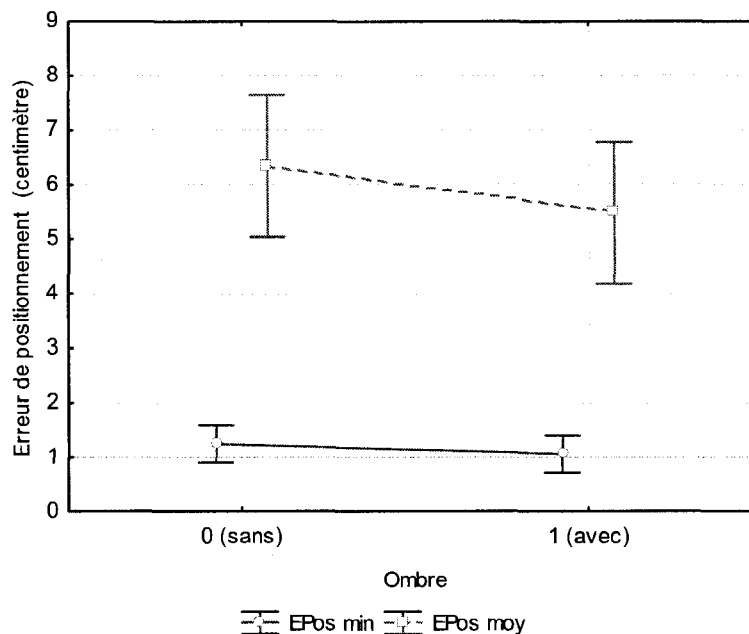


Figure 5.11 : Variation des erreurs de positionnement en fonction de l'utilisation de l'ombrage

5.3.6 Courbe d'apprentissage

La figure 5.12 donne la courbe d'apprentissage des sujets suivant le temps total requis pour terminer un essai. L'apprentissage observé est accentué au début d'un bloc d'essai pour ensuite atteindre un minimum vers le 18ème essai. Cela montre que le nombre d'essais utilisés pour cette expérience est approprié. Cela dénote également que l'utilisation du système RV requiert un certain degré d'apprentissage avant que le sujet devienne confortable avec les manipulations à effectuer.

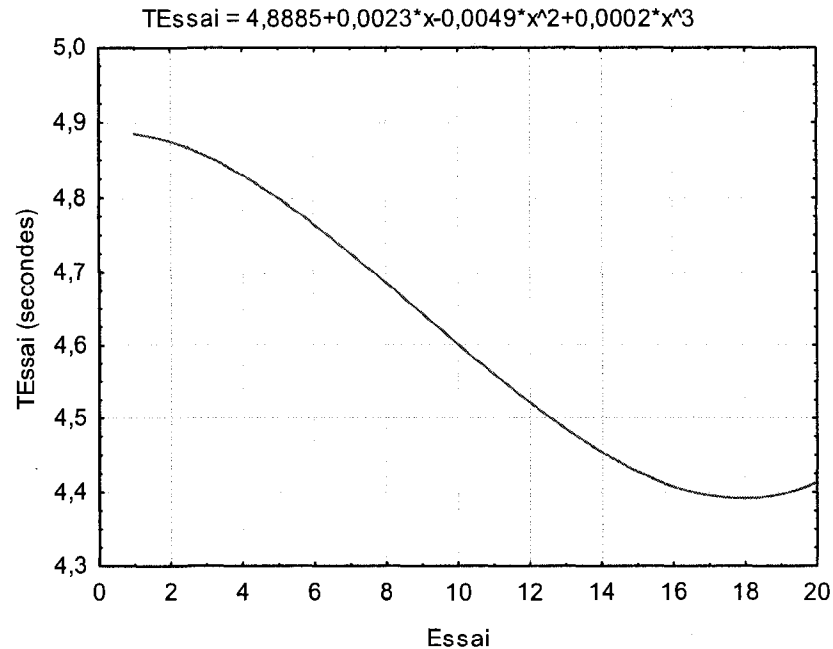


Figure 5.12 : Courbe d'apprentissage en fonction des temps d'essai

La figure 5.13 donne la courbe d'apprentissage des sujets en fonction de l'évolution des erreurs de positions faites au cours des essais effectués. Ici, l'apprentissage est légèrement plus rapide que sur la figure 5.12 pour atteindre un maximum vers le 16^e essai. Par la suite on voit une légère dégradation des performances possiblement à cause de la fatigue suite à l'exécution répétée d'une même tâche. Contrairement à ce que nous avons pu observer dans l'expérience portant sur les repères, ici les courbes d'apprentissage en temps et en précision sont presque identiques. L'apprentissage et la fatigue du sujet ne semblent donc pas affecter les temps de manipulation des IHM plus que la précision de manipulation de celles-ci.

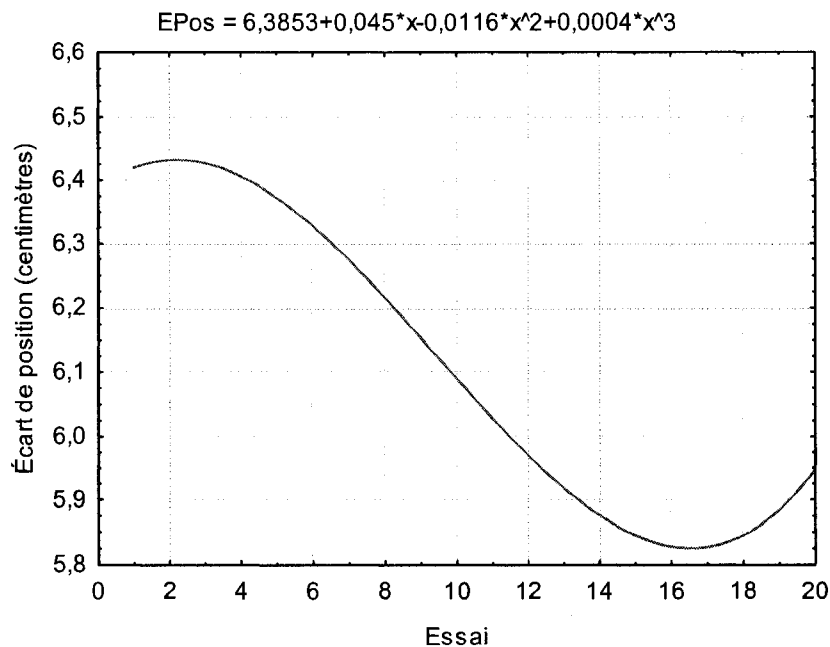


Figure 5.13 : Courbe d'apprentissage en fonction des écarts de position

5.3.7 Différences attribuables au genre

Le genre est une variable qui influence fortement les performances globales des sujets comme nous l'avons précédemment noté dans les résultats de l'analyse de variance. Dans la figure 5.14, on observe que les femmes sont en général moins rapides que les hommes. Cet écart de performance est d'environ une demi-seconde en moyenne par essai. Cette différence de performance semble être plus spécifique à la sous-tâche du déplacement du curseur. Des différences similaires entre les genres avaient été notées lors de l'expérience sur les repères.

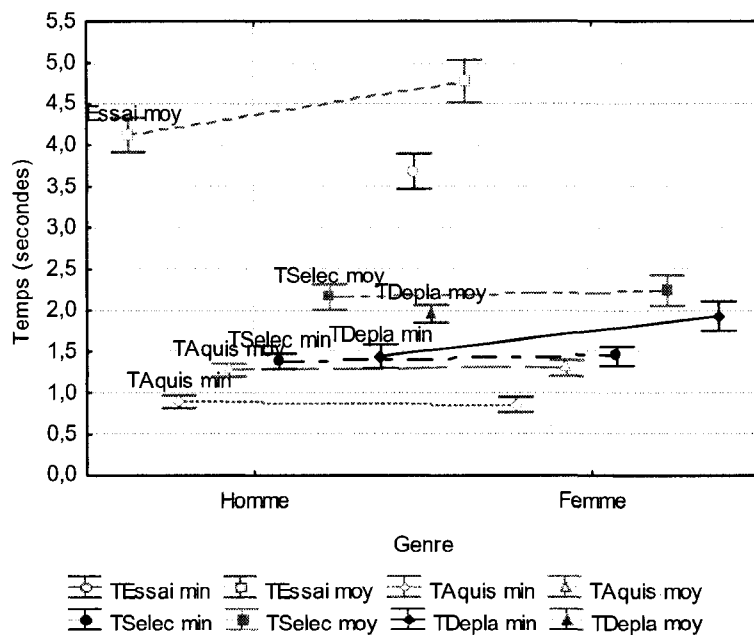


Figure 5.14 : Variation des temps d'essai moyens en fonction du genre

Par contre, si on regarde du côté de la précision de manipulation des IHM, on voit que les femmes sont plus précises que les hommes. Un autre point que l'on note en regardant la figure 5.15 est que la variabilité est plus grande chez les femmes que chez les hommes. Les femmes sont donc plus précises en général mais ont des performances moins constantes ou stables. Encore ici, cette observation confirme celle faite lors de l'expérience précédente sur les repères.

Comparativement à l'expérience 1, l'erreur de positionnement est pratiquement deux fois plus élevée que celle précédemment observée. L'erreur moyenne était de 3,1 cm sur 12.8 cm lors de la première expérience alors qu'elle est de 5.9 cm pour 12.8 cm dans le cas présent. En pourcentages, cela donne 24% d'erreur moyenne pour la première expérience et 46% pour la seconde. Toujours en comparant les deux expériences, on constate que ce sont les hommes qui ont le plus vu leurs erreurs augmenter. Les erreurs de positionnement chez les femmes ont augmenté, passant de 3 cm à 5.1 cm (41% d'augmentation). Pour les hommes, l'erreur est passée de 3.25 cm à 6.75 cm (52%

d'augmentation). Encore ici, cela vient confirmer le constat fait lors de la première expérience, à savoir que les hommes favorisent la rapidité plutôt que la précision lors de l'exécution de la tâche. Il est important de se rappeler que dans le cadre de cette deuxième expérience nous n'imposons pas de contrainte de précision de manipulation. Ceci avantage donc les sujets qui favorisent la rapidité plutôt que la précision, car une manipulation comportant une plus grande erreur de position n'empêchera un essai d'être considéré comme un succès et de prendre fin.

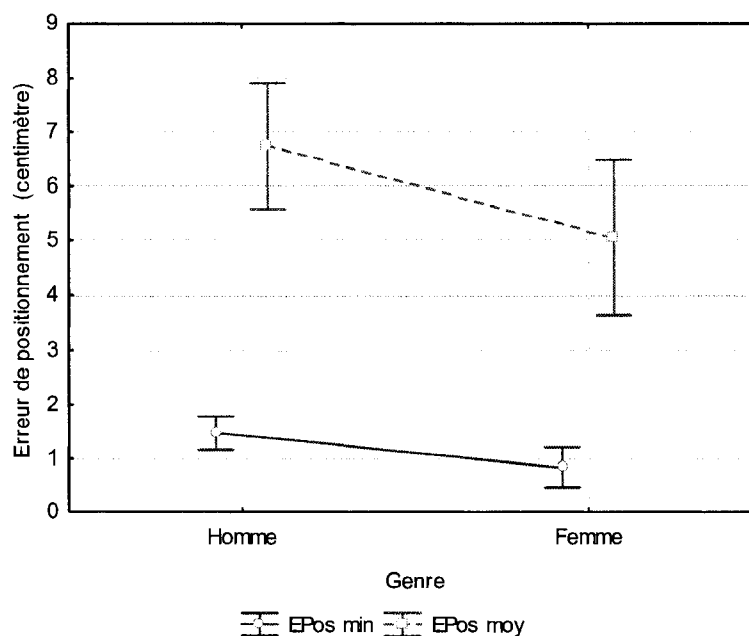


Figure 5.15 : Variation des erreurs de positionnement en fonction du genre

5.3.8 Résultats qualitatifs

Les résultats qualitatifs se répartissent en deux groupes. Il y a d'abord les informations subjectives recueillies sous forme de commentaires verbaux entre chaque essai. Il y a ensuite les résultats quantitatifs qui proviennent des réponses recueillies par l'entremise du questionnaire.

Le tableau 5.18 donne une compilation des principaux commentaires faits par les sujets tout au long de l'expérience. Nous avons reformulé les commentaires similaires aux fins de compilation dans notre tableau.

Tableau 5.18 : Compilation des commentaires faits par les sujets

Commentaire	Nombre d'occurrences	Occurrence en %
Le système de visée m'aide	11	25,00%
La couleur m'aide	10	22,73%
L'ombrage ne m'aide pas ou nuit	5	11,36%
Si l'ombre était plus foncée, elle serait peut-être utile	5	11,36%
Ça prend la couleur avec un des 2 autres	5	11,36%
L'ombrage m'aide	4	9,09%
Quand séparés, l'ombre et le système de visée se valent	3	6,82%
C'est fatigant quand il n'y a pas de changement de couleur	1	2,27%

Les commentaires des sujets concordent avec les résultats quantitatifs. Le système de visée et la couleur sont effectivement considérés par les sujets comme étant les rétroactions visuelles les plus utiles. Les deux commentaires qui suivent à propos de l'ombrage indiquent que celle-ci n'est pas considérée comme utile et comporte des lacunes de design. Comme pour l'expérience précédente, des problèmes de contraste trop faible dans la scène sont mentionnés par les sujets. Une remarque intéressante qui est apparue à plusieurs reprises est que la couleur est essentielle ou la plus désirable, mais qu'elle n'est vraiment efficace que quand considérée en combinaison avec l'une des deux autres, soit le système de visée ou l'ombrage. Ceci confirme les résultats des analyses de variance précédentes qui ont indiqué à plusieurs reprises des interactions entre ces trois facteurs. La dernière remarque concorde essentiellement avec la deuxième, à savoir que la couleur aide la manipulation de l'IHM.

A la fin de l'expérience, chaque sujet était invité à répondre à des questions qualitatives nous permettant de voir si les résultats quantitatifs mesurés concordaient avec les impressions subjectives des sujets. Les tableaux qui suivent donnent le sommaire des réponses des sujets.

Nous avons demandé à chacun des sujets de nous indiquer leurs préférences au sujet des rétroactions visuelles. Nous leurs avons demandé de classer les rétroactions visuelles par ordre d'importance de un à trois, un était la plus préférée et trois la moins importante à leurs yeux. Le tableau 5.19 donne la compilation des résultats.

Tableau 5.19 : Préférence des sujets relative à la rétroaction visuelle

	rang		
	1	2	3
couleur	5	6	1
système de visée	4	4	3
ombre	4	2	7

Le tableau 5.19 donne le nombre de fois que chaque rétroaction visuelle a été choisie, et ce, pour trois niveaux de préférence. Le premier rang correspond à la rétroaction que le sujet a préférée. On note que cinq personnes ont placé la couleur au premier rang, six personnes au deuxième rang et une personne à troisième rang. La figure 5.16 permet une analyse plus aisée et rapide de ces résultats.

La rétroaction visuelle jugée la plus utile est la couleur, suivie du système de visée et de l'ombrage au dernier rang comme le montre la figure 5.16.

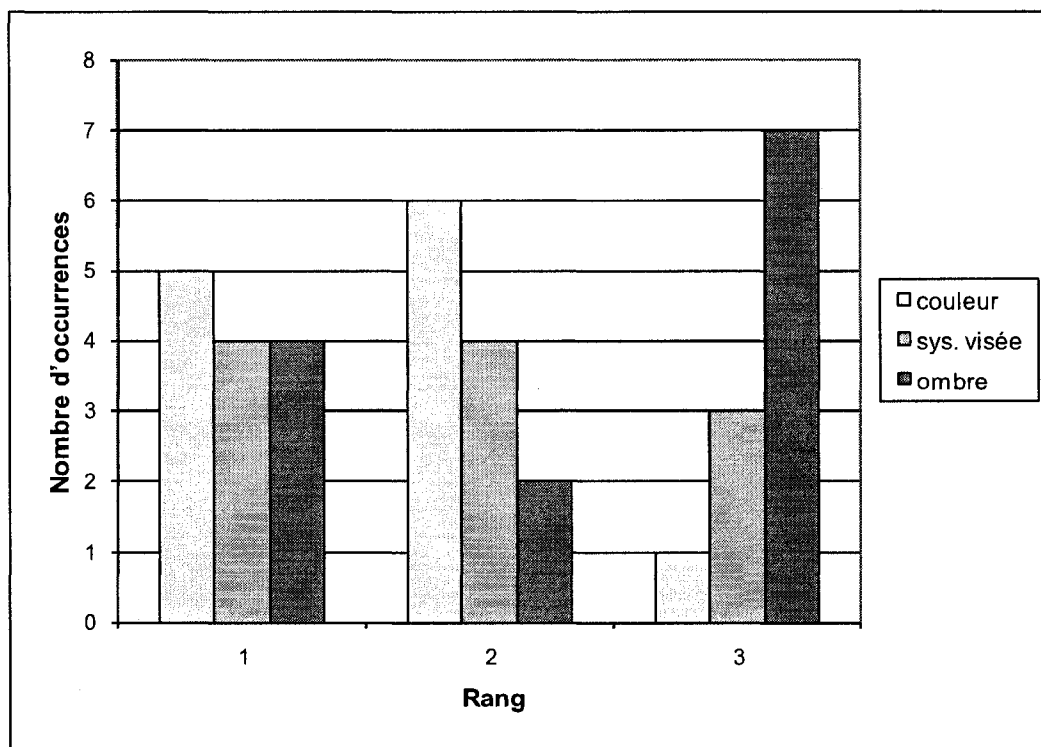


Figure 5.16 : Préférence des sujets relative à la rétroaction visuelle

Des données sur la fatigue et le confort du sujet ont également été recueillies. Les résultats indiquent que l'utilisation du système RV ne causait pas de fatigue ou de charge cognitive inhabituelle. Le tableau 5.20 donne la compilation des résultats obtenus.

Les niveaux de fatigue observés sont comparables à ceux de l'expérience 1, ce qui semble indiquer que le niveau de difficulté ainsi que l'effort cognitif exigé par la manipulation de l'IHM restent dans des limites raisonnables.

Tableau 5.20 : Résultats qualitatifs sur le niveau de fatigue des sujets

Niveau de fatigue	Occurrences	Occurrences en %
0 - nulle	2	14%
1 - faible	5	36%
2 - moyenne	7	50%
3 - forte	0	0%
4 - très élevée	0	0%

Nous avons demandé aux sujets de nous indiquer, s'il y a lieu, les sensations d'inconfort perçues à la fin de la séance d'expérimentation. Le tableau 5.21 donne l'occurrence des symptômes perçus.

Tableau 5.21 : Liste des symptômes perçus par les sujets

Symptômes	Occurrences	Occurrences en %
maux de tête	4	40%
vision floue	4	40%
fatigue musculaire	1	10%
étourdissements	1	10%

Les principaux symptômes notés sont des légers maux de tête ainsi qu'une fatigue oculaire due à la faible résolution et au champ de vision restreint du casque immersif utilisé. Comme ce fut le cas lors de l'expérience 1, les sujets ne se sont pas plaints d'une fatigue perceptible durant l'expérience. Cela va dans le sens des observations faites par d'autres groupes de recherche que l'utilisation d'une simulation présentée dans un casque immersif permet de détourner les points d'intérêt et de concentration d'un individu et de diminuer leur sensibilité à percevoir certains symptômes comme la douleur.

5.4 Discussion

5.4.1 *Rétroaction visuelle optimale*

Considérant les statistiques descriptives, le changement de couleur des éléments d'interfaces ressort comme étant la rétroaction visuelle la plus efficace en ce qui concerne l'amélioration des performances de l'utilisateur. Cela dit, il faut garder à l'esprit que ces résultats ne sont pas statistiquement significatifs. Cependant, l'observation des statistiques descriptives est encourageante et nous incite à poursuivre notre recherche même si elle ne permet pas d'apporter une preuve formelle quant à l'exactitude des conclusions que l'on pourrait tirer à ce point-ci.

Lors de nos expériences, les deux couleurs utilisées étaient le jaune et le vert, qui offrent des forts changements de contraste. Ces changements visuels, facilement perceptibles à l'œil, favorisent une réaction rapide chez l'utilisateur. Il semble y avoir une forte relation entre le contraste et la luminosité d'un changement visuel et le niveau de perception de ces changements chez l'utilisateur. Plusieurs sujets ont fait la remarque que l'ombre projetée par la main virtuelle n'était pas assez contrastante ou trop sombre pour être vraiment utile. Ces observations concordent avec les résultats antérieurs relatés dans la littérature sur les IHM 2D comme précédemment mentionnés au début de ce chapitre. Nous pouvons donc penser que ces résultats antérieurs chez les IHM 2D s'appliquent également au niveau des IHM 3D.

5.4.2 *Précision versus temps de manipulation*

Dans cette expérience, contrairement à l'expérience 1, nous n'imposons pas une zone précise où le relâchement du curseur était considéré comme valide. Ainsi, comme le sujet pouvait lâcher le curseur à n'importe quel endroit sur la plage de déplacement du curseur, les temps de manipulation ont eu tendance à être plus uniformes. Les mouvements des sujets étaient plus répétitifs que pour la première expérience. Ceci vient du fait que même si le curseur était relâché loin de la flèche verte, l'essai était quand

même considéré comme réussi et les calculs de temps suspendus.

Par ailleurs, nous avons observé un comportement redondant chez les sujets concernant l'approche d'une cible. Nos observations révèlent un patron de mouvement en forme de spirale, partant de l'extérieur et convergeant vers le point central visé. Il semble donc que les sujets ont adopté une approche suivant une loi d'essai et erreur sur les deux axes formant le plan du panneau de dialogue. Ce patron met aussi en évidence que les sujets se fiaient fortement à leur sens de vision pour converger vers la cible. Ceci implique qu'ils ne se basaient pas uniquement sur leur mémoire kinesthésique et proprioceptive de leurs mouvements (un mouvement dit « machinal »), du moins pour ce qui est de l'acquisition de la cible.

Par opposition, la précision observée dans les essais répétés a montré qu'il y avait plus de variabilité dans les résultats. Cela est encore explicable par le fait que l'on n'imposait pas de zone déterminée pour permettre la fin d'un essai. Lors de l'expérience 1, si le curseur était relâché trop loin de la zone minimale, l'essai ne prenait pas fin et le chronométrage continuait. Dans ce cas-ci, sans cette contrainte, les écarts de positions du curseur pouvaient être plus importants dû à la liberté supplémentaire offerte.

En n'imposant pas de zone de relâchement, nous avons favorisé la rapidité d'exécution (certains essais ont pu être complétés plus rapidement qu'ils ne l'auraient été en présence d'une contrainte « modératrice ») et, en contrepartie, désavantagé la précision de manipulation.

5.4.3 Considérations relatives au genre des sujets

Les observations à cet égard sont essentiellement les mêmes que pour l'expérience 1. Les femmes semblent être plus méticuleuses et appliquées que les hommes. Cela leur permet d'être plus précises de manière générale. Par contre, le fait de ne pas imposer une zone de relâchement du curseur semble avoir eu des conséquences négatives sur les

performances des hommes de sorte que les différences de performances entre les genres tendent à s'accroître. De manière générale, les performances liées à la précision se sont détériorées autant chez les hommes que chez les femmes, mais de manière plus prononcée chez les hommes. Globalement, les écarts de manipulation sont passés de 3.1% à 5.9%, ce qui constitue une détérioration notable. Les temps de manipulation ont quant à eux diminué d'une seconde en moyenne par rapport à l'expérience 1, ce qui représente une amélioration. Cette apparente amélioration de la rapidité d'exécution semble plus être une conséquence de l'abolition de la restriction relative à la zone de relâchement permise, et ne constitue pas en soi un indice valable d'une réelle amélioration des performances du sujet. En effet, selon les résultats de la présente expérience, nous estimons que la précision était le facteur dominant pour mesurer la performance globale du sujet.

5.4.4 Préférences de l'utilisateur versus résultats d'analyse

Dans cette expérience, les résultats quantitatifs et qualitatifs concordent bien, contrairement à ce qui avait été observé lors de la première expérience. Les sujets ont en effet préféré le changement de couleur des éléments d'interface, suivi de la rétroaction du système de visée. L'ombre a été perçue comme n'apportant pas de réels bénéfices ou comme étant même nuisible par la majorité des sujets.

Ces observations nous portent à croire que cette expérience donne une bonne mesure de la performance humaine pour les trois facteurs étudiés, à la fois pour ce qui est de la performance et de la satisfaction des utilisateurs du système RV utilisé.

5.5 Conclusion

Cette deuxième expérience nous a permis d'obtenir des mesures quantitatives et qualitatives sur l'impact de trois rétroactions visuelles sur les performances de

l'utilisateur. Les résultats des tests statistiques montrent que les différences entre les moyennes ne sont pas significatives sur le plan statistique, cependant les statistiques descriptives sont encourageantes dans la mesure où elles montrent que le changement de couleur semble être la rétroaction visuelle prédominante permettant une amélioration des performances de l'utilisateur.

L'impact de l'utilisation du système de visée et de l'ombre sur la performance des sujets est relativement faible, voire même négatif. L'élimination de l'obligation de respecter une zone de relâchement du curseur est une cause possible de ces résultats décevants.

L'impact de l'utilisation de l'ombrage s'est révélé comme étant neutre ou négatif pour ce qui est des performances de l'utilisateur. Étant donné son caractère naturel, nous nous attendions à ce qu'elle soit en tête de liste des rétroactions visuelles. Cela démontre qu'on ne peut prendre pour acquis qu'une rétroaction dite « naturelle » soit plus efficace qu'une méthode plus abstraite. D'autres facteurs influent sur la performance finale d'une rétroaction comme le niveau de contraste ainsi que les couleurs utilisées. Il faudrait donc faire une autre expérience relative à l'ombre en faisant varier le contraste de celle-ci pour savoir si c'est la rétroaction qui n'est pas efficace, ou si c'est plutôt une mauvaise calibration de ses paramètres.

Les leçons que nous pouvons tirer de cette expérience sont :

- que les rétroactions doivent offrir un guidage visuel complet et explicite.

Le système de visée version 1 n'offre pas suffisamment d'information visuelle pour ce qui est d'aider l'utilisateur à converger vers un point précis dans l'espace avec le pointeur virtuel. Il comporte également des lacunes d'occlusion ne permettant pas à l'utilisateur de maintenir un contact visuel avec la rétroaction visuelle dans des circonstances où l'information de cette rétroaction est requise.

- sur le plan méthodologique, nous devrions utiliser une tâche plus longue, plus variée et plus difficile pour bien faire ressortir les différences de performances.

Le temps requis pour effectuer la tâche était trop court par rapport aux temps associés aux variations de lectures dues aux bruits de senseur et autres parasites. De ce fait, les mesures sont plus affectées par ces bruits étant de durée comparable. En augmentant les temps de manipulation, l'impact sur les résultats des variations rapides de lectures dues aux bruits de senseur est ainsi minimisé.

En se basant sur nos observations, les résultats obtenus et les données subjectives recueillies auprès des sujets dans cette deuxième expérience, nous pouvons formuler les recommandations suivantes pour la conception des rétroactions visuelles pour les IHM RV :

- utiliser des changements de couleur des éléments d'interface pour les changements d'état importants du système RV;
- éviter la surcharge cognitive en utilisant un nombre réduit de rétroactions visuelles de façon simultanée;
- améliorer la perception des distances et du positionnement spatial général de l'utilisateur par l'utilisation de rétroactions telles que celle du système de visée.
- utiliser des niveaux de contrastes adéquats pour les diverses rétroactions visuelles de manière à ce que les changements d'état soient visibles et facilement perceptibles.

CHAPITRE 6 - INTERACTIONS AVEC DES MENUS FLOTTANT DANS UN CONTEXTE D'APPLICATION RV CONCRETE

Expérience 3 – Étude expérimentale de l'impact sur la performance humaine de panneaux de dialogue appliqué à un cas réel d'application – la calculatrice

6.1 Introduction

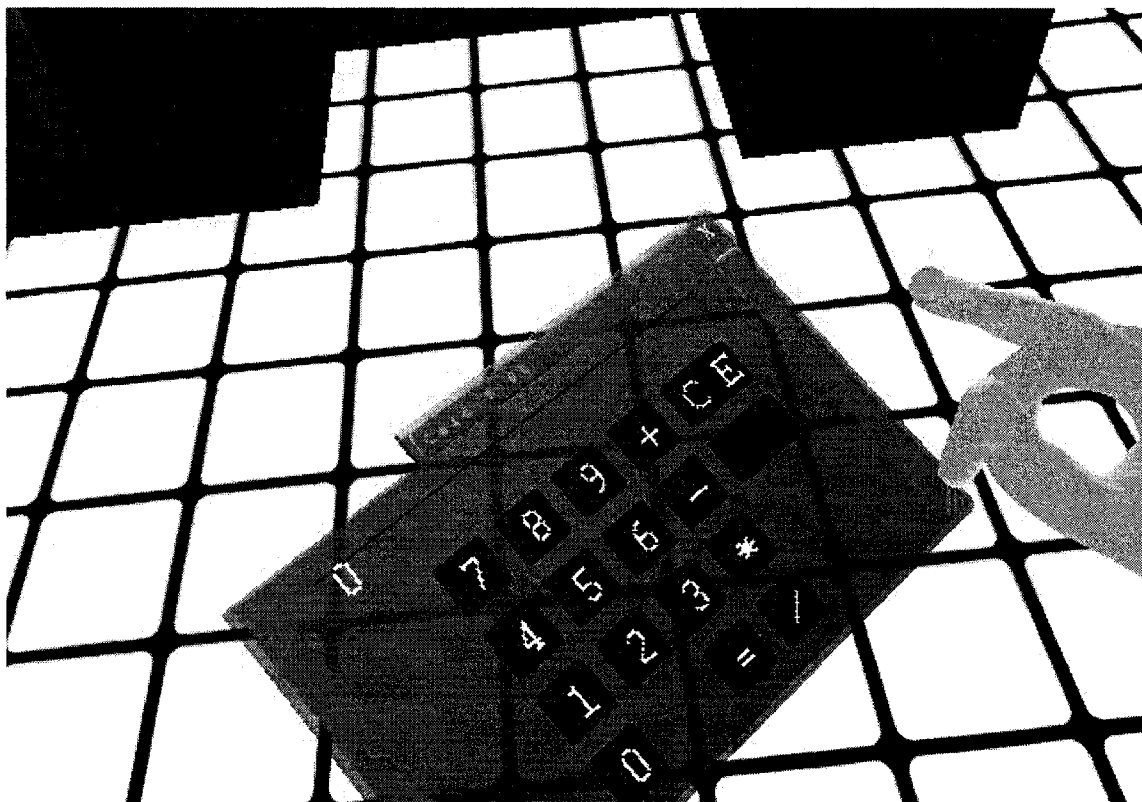


Figure 6.1 : Calculatrice virtuelle de l'expérience 3

La troisième expérience que nous avons réalisée porte sur l'étude des performances humaines lorsqu'on utilise un guidage visuel pour faire différentes manipulations avec des panneaux de dialogue dans un SRV. Ce guidage visuel se veut plus explicite,

complet et utile que celui utilisé dans les expériences précédentes. Il consiste à utiliser les changements de couleur, ainsi qu'une version améliorée du système de visée (version 2) et de l'ombre (version 2). Nous avons également augmenté la durée et la difficulté de la tâche pour la troisième expérience demandant aux sujets d'effectuer un calcul simple sur une calculatrice virtuelle.

Nous visions à ce que la tâche requiert plus de temps à effectuer et un plus haut degré de concentration de la part de l'utilisateur. La tâche d'effectuer un calcul arithmétique sur une calculatrice requiert plusieurs manipulations de boutons virtuels et la lecture de chiffres sur écran virtuel. Elle requiert également une plus grande mobilité de la main (pointeur virtuel) suivant les deux axes du plan de la surface de la calculatrice (haut — bas et gauche — droite). La disposition des touches groupées offre aussi une difficulté accrue de manipulation, car la main de l'utilisateur peut dévier lors de l'enfoncement d'une touche pour en accrocher une autre voisine. L'utilisation de la calculatrice pose donc des défis importants pour l'utilisateur. Les multiples manipulations permettent d'assurer un temps d'essai plus long et également d'augmenter le degré de difficulté.

6.2 Méthodologie

6.2.1 La plateforme d'expérience

Afin de mesurer les performances de l'utilisateur en fonction du type de rétroaction utilisé, nous avons utilisé la plateforme de tests RV développée pour les expériences 1 et 2 en y apportant quelques modifications. La plateforme de test RV est constituée d'un panneau de dialogue, statique par rapport à la scène, permettant aux sujets de contrôler l'évolution de l'expérience en cours et d'obtenir des informations sur celle-ci. Le menu de contrôle affiche des informations sur le bloc et le numéro de l'essai en cours. Deux boutons sur ce menu permettent au sujet d'expérience de contrôler le début de chaque essai. Le bouton portant la mention « pratique » permet de démarrer un essai en mode pratique tandis que l'autre bouton portant la mention « débiter » démarre les essais en

mode normal. Dans le mode pratique, le sujet est libre de manipuler les interfaces sans que des données soient mémorisées par le système. Dans ce mode, chaque cas est présenté une seule fois pour permettre un survol rapide des cas possibles qui seront rencontrés durant l'expérience. Une fois que le sujet enfonce le bouton « démarrer », il donne le signal de départ au SRV qui enclenche le mode normal de l'expérience. Une fois ce mode enclenché, il est impossible de revenir en mode pratique et le bouton « pratique » devient inactif. Le sujet contrôle le rythme de l'expérience car il doit enfonce le bouton « démarrer » pour dire au SRV qu'il est prêt à effectuer un nouvel essai.

Nous avons réutilisé les mêmes trois rétroactions visuelles que celles étudiées dans l'expérience 2, soit le changement de couleur, le système de visée et l'ombre projetée. Cependant, des changements fonctionnels ont été apportés à deux de ces rétroactions afin de tester des améliorations potentielles sur celles-ci. Suite aux observations et aux commentaires des sujets lors de l'expérience 2, nous avons noté des difficultés de manipulation des interfaces reliées au manque de visibilité des éléments d'interface et à l'obstruction du champ visuel de l'utilisateur. Nous avons constaté que dans certains cas, la droite du système de visée devient invisible lorsque l'angle de regard de l'utilisateur coïncide avec l'axe de la droite. Dans cette situation, le doigt de l'utilisateur est placé au dessus de la droite et au-dessus de l'élément d'interface, obstruant ainsi ces deux derniers. Nous avons donc modifié l'algorithme du système de visée avec comme objectif de permettre à l'utilisateur de conserver un contact visuel avec les interfaces, et ce, en tout temps, même dans des conditions d'obstructions.

Nous avons donc ajouté un critère au design du système de visée :

- la rétroaction visuelle doit permettre à l'utilisateur de conserver un contact visuel sur la position spatiale d'un élément d'interface situé vis-à-vis le pointeur virtuel, même dans des conditions d'obstructions.

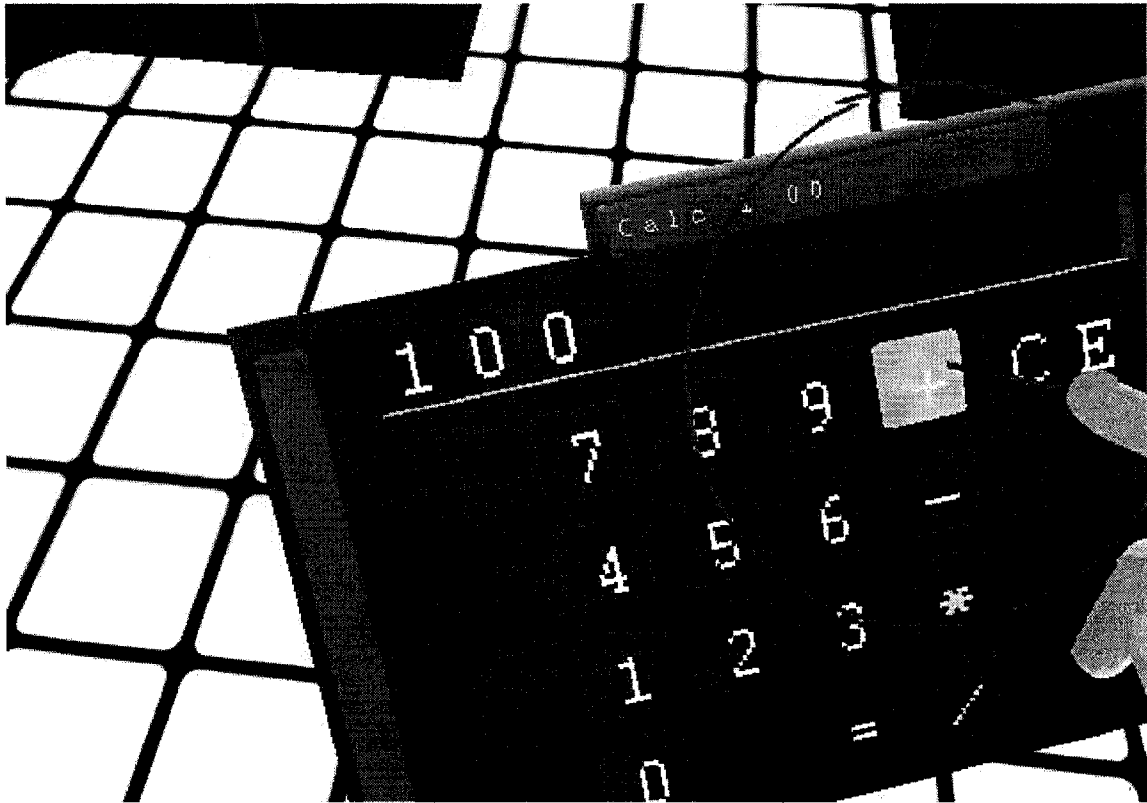


Figure 6.2 : La calculatrice virtuelle avec les rétroactions de couleur, du système de visée (version 2) et de l'ombre (version 2)

Ceci a donné naissance à la version 2 du système de visée qui comprend une droite entre le doigt de l'utilisateur (le pointeur ou curseur) et l'élément d'interface ainsi qu'un cercle parallèle au plan de l'IHM. La droite est affichée de manière à être toujours perpendiculaire à la surface du panneau de dialogue ou de l'élément d'interface. Le cercle est centré sur la base de la droite, c.-à-d. à l'endroit où la droite coïncide avec l'IHM. La droite se retrouve donc perpendiculaire au cercle, créant une base de référence visuelle tridimensionnelle fournissant des informations selon les trois dimensions (voir la figure 6.2). De cette manière, le système de visée fournit une solution visuelle au problème du positionnement pointeur / IHM, quel que soit l'angle de regard de l'utilisateur par rapport au système de visée. De plus, le rayon du cercle varie en fonction de la distance entre le doigt et la surface du panneau de dialogue. Les

informations de positionnement et de distance sont donc dupliquées, de manière à rester visibles peu importe l'angle de regard. Dû à leur configuration exploitant les trois axes du repère tridimensionnel, soit la ligne ou le cercle restent en tout temps visibles.

Nous avons également apporté quelques modifications à l'ombre projetée. Suite à des observations faites lors de l'expérience 2, nous avons modifié l'algorithme de l'ombre pour que son degré d'opacité change en fonction de la distance entre la main virtuelle et la surface où l'ombre est projetée. Lorsque la main virtuelle s'éloignait de la surface du panneau de dialogue, l'ombre devenait graduellement plus transparente pour devenir invisible au-delà d'une distance donnée. Le but visé était de rendre l'ombre la plus réaliste et naturelle possible aux yeux des sujets en adoptant un comportement se rapprochant davantage de la réalité. Ce comportement permet également de pouvoir estimer visuellement la distance entre la main et le panneau de dialogue. Le lecteur est invité à revoir le chapitre précédent pour les descriptions des versions initiales des trois rétroactions visuelles. La figure 6.2 donne un aperçu des trois rétroactions visuelles en action.

Pour cette expérience, nous avons utilisé le repère 2 qui place le panneau de dialogue suivant la position (mais pas la rotation) du corps de l'utilisateur. Un des avantages de ce repère est qu'il rend la position verticale des panneaux de dialogue indépendante de la taille du sujet. Nous avons calibré les menus pour qu'ils apparaissent toujours à 1.3 mètre sous la ligne des yeux du sujet. Ceci permet un meilleur confort et élimine les problèmes de configurations relatifs aux différentes tailles des sujets.

Les dimensions de la calculatrice étaient les mêmes que pour les panneaux de dialogue précédemment utilisés, soit 30 centimètres de largeur par 20 centimètres de hauteur. En ce qui a trait au design de la calculatrice, nous nous sommes basés sur la disposition de touches rencontrée sur une calculatrice standard de bureau ainsi que celle offerte à l'intérieur de l'environnement WIMP Microsoft Windows. La figure 6.1 illustre les composantes formant la calculatrice virtuelle utilisée.

La dimension des touches carrées est de 2.5 cm par 2.5 cm. Celle des touches rectangulaires est de 4.2 cm sur l'axe horizontal par 2.5 cm sur l'axe vertical. L'épaisseur des touches est de 0.2 cm. L'espacement entre chaque touche formant la matrice numérique est de 0.6 cm. L'écran numérique mesure 22.5 cm sur l'axe horizontal par 1.9 cm verticalement. Comme notre plateforme RV est à l'échelle, ces dimensions représentent la taille physique des boutons tels que perçus par les sujets lors de leurs manipulations.

Pour établir le dimensionnement des boutons, nous avons pris en considération la taille physique du bout de l'index d'un humain que nous assumons être d'environ 1.5 cm de largeur suivant des mesures faites sur nous-mêmes. Nous avons également pris en compte la précision du dispositif de suivi de position ainsi que la présence de bruit de lecture avec celui-ci. Après des essais préliminaires effectués avec le matériel, nous avons déterminé qu'une largeur de 2.5 cm pour les boutons les plus petits (ceux qui sont carrés) permet une manipulation adéquate de ceux-ci par les sujets. Le critère pour établir les dimensions est fondé sur le chronométrage de quelques essais où le sujet doit effectuer un calcul. Nous avons effectué des tests qui ont montré que les manipulations pouvaient être effectuées à l'intérieur d'un délai de 25 secondes. Cette durée d'essai est raisonnable compte tenu de la tâche décrite à la section suivante et du temps total d'expérimentation pour lequel nous visions un maximum d'une heure de manipulations par sujet. Pour 25 secondes par essais, nous obtenons 8 cas x 15 répétitions x 25 secondes, ce qui donne 3000 secondes (50 minutes).

6.2.2 La tâche

Nous demandions au sujet d'effectuer un calcul arithmétique simple en utilisant une calculatrice virtuelle présentée sur un panneau de dialogue. Le calcul à effectuer requérait toujours d'enfoncer huit touches afin d'assurer que les mesures soient indépendantes du calcul arithmétique demandé.

Le calcul arithmétique demandé variait d'un essai à l'autre parmi une liste de 10 équations différentes possibles. On avait ainsi un nombre suffisant de cas différents pour s'assurer que le sujet ne puisse pas mémoriser les calculs à effectuer et répéter machinalement les mêmes gestes d'un essai à l'autre. Le tableau 6.1 donne la liste des 10 équations possibles.

Tableau 6.1 : Liste des 10 équations de l'expérience 3

Numéro d'équation	Équation	Résultat requis
1	$4 + 5 * 8 / 4 =$	18
2	$86 - 14 / 2 =$	36
3	$436 / 2 * 5 =$	1090
4	$58 + 67 / 5 =$	25
5	$6 * 12 + 58 =$	130
6	$49 - 3 * 57 =$	2622
7	$3 * 65 - 15 =$	180
8	$7 - 5 + 657 =$	659
9	$753 * 7 - 6 =$	5265
10	$59 + 4379 =$	4438

Les équations étaient présentées de manière linéaire et dans l'ordre apparaissant dans le tableau, en allant de l'équation 1 à l'équation 10, pour ensuite recommencer à l'équation 1. Ceci permettait de toujours avoir neuf équations différentes entre l'équation actuelle et la prochaine apparition de celle-ci. Nous avons utilisé ce cycle afin de limiter le phénomène de mémorisation de l'équation qui pourrait avoir eu un impact sur la rapidité d'exécution de chaque essai.

Nous demandions aux sujets d'effectuer le calcul exactement tel que présenté, sans tenir compte de la priorité des opérations arithmétiques. Ils devaient donc entrer les touches,

incluant la touche '=', tel que présenté dans tableau 6.1. Il n'y avait pas de touche mémoire sur notre calculatrice, car le sujet n'avait pas à effectuer de calculs partiels pour arriver au résultat final. Le calcul était réalisé d'un seul coup, suivant une seule séquence possible. Nous avons imposé cette contrainte de manière à axer nos mesures uniquement sur la manipulation des IHM. Ce qu'il importait de mesurer ici, était le temps requis pour déplacer la main (le pointeur virtuel) d'un bouton à l'autre et d'appuyer sur des touches. Le fait d'avoir permis aux sujets d'effectuer le calcul en suivant leur connaissance de l'arithmétique aurait introduit d'autres facteurs influençant la rapidité d'exécution de la tâche, ce qui n'était pas désirable ici. La figure 6.3 montre un sujet en train d'effectuer la tâche demandée.

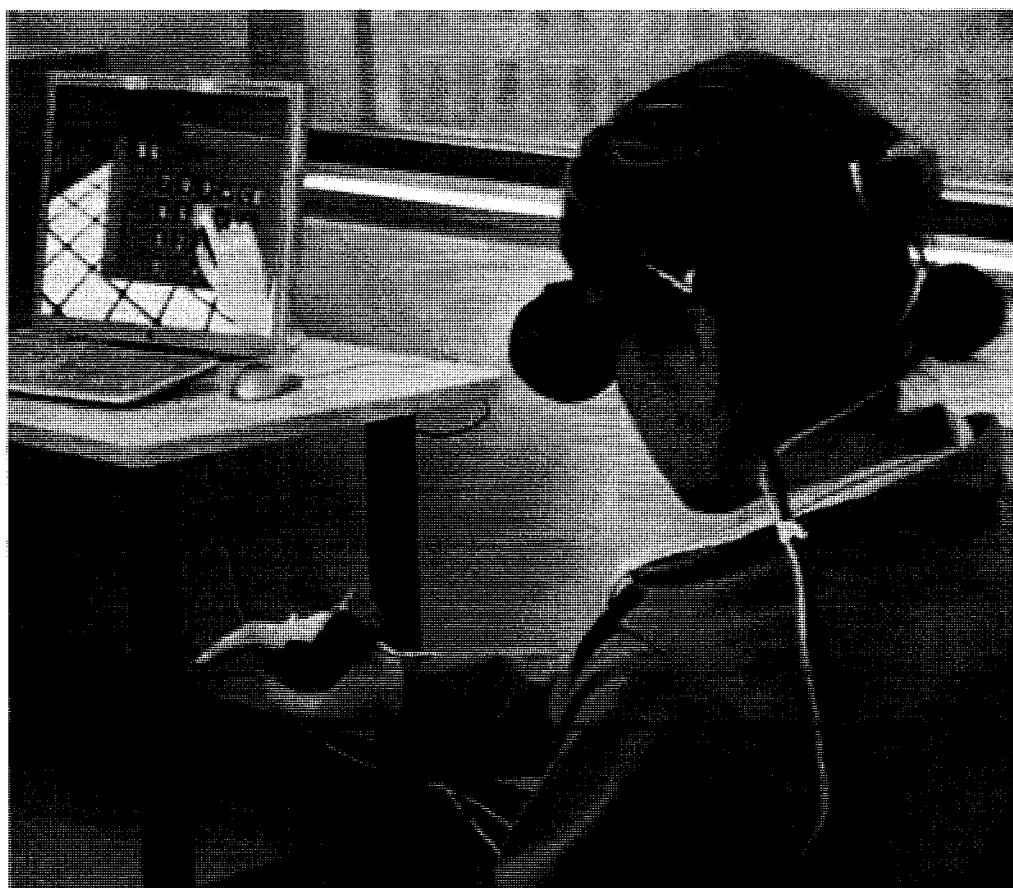


Figure 6.3 : Un sujet effectuant la tâche de l'expérience 3

Pour montrer l'équation à effectuer au sujet, nous présentions deux panneaux de dialogue dans la scène, devant le sujet. Un premier panneau de dialogue affichait l'équation à effectuer et se trouvait à la hauteur des yeux du sujet. Ce menu restait visible tout au long de l'essai. L'autre panneau de dialogue était la calculatrice virtuelle. La figure 6.4 donne un aperçu de ce que l'utilisateur voyait.



Figure 6.4 : Les panneaux de dialogue de l'expérience 3 tels que vus par le sujet

Nous demandions au sujet d'effectuer les mouvements le plus rapidement possible. Nous lui demandions également de faire chaque essai en suivant l'ordre suivant :

1. Lire à haute voix l'équation sur le panneau de dialogue tout en gardant la main au repos, le long du corps.
2. Effectuer le calcul de mémoire, en évitant de regarder l'équation sur l'autre panneau de dialogue, en se concentrant sur la calculatrice.

Nous demandions aux sujets de lire à haute voix et de faire le calcul de mémoire afin de limiter l'impact sur les temps mesurés dus aux mouvements de va-et-vient de la tête et du regard, ainsi que des temps associés à la relecture de l'équation. Cela dit, il leur était possible de relire l'équation sur le panneau de dialogue si nécessaire.

Le sujet n'avait aucune limite de temps imposée pour effectuer la manipulation. La fin de chaque essai était déterminée par le résultat affiché par la calculatrice. Le chronométrage de l'essai prenait fin uniquement si le résultat affiché correspondait bien à celui de l'équation demandée. Dans le cas où le résultat obtenu n'était pas bon, le chronométrage continuait et le sujet devait appuyer sur la touche « CE » pour réinitialiser la calculatrice à zéro et refaire le calcul en entier.

6.2.3 *Les sujets*

Quatorze sujets, composés de 7 hommes et de 7 femmes, ont participé à l'expérience. L'âge moyen était de 27 ans, couvrant une plage allant de 18 à 50 ans. Les sujets devaient minimalement avoir 18 ans, être droitiers et être en mesure de percevoir correctement les couleurs. Le prérequis exigeant d'être droitier provient de considérations d'ordre technique. Nos menus ont été conçus pour une utilisation par des droitiers. Pour les besoins de nos tests, nous n'étions pas intéressés par les différences entre des sujets droitiers et gauchers. L'inclusion de ceux-ci dans les tests aurait exigé une adaptation de l'ensemble de notre plateforme de test. Le second prérequis concernant la vision correcte des couleurs vient essentiellement du fait que l'environnement virtuel utilise le changement de couleur de certains éléments d'interface dans le cadre de nos tests. Il est donc nécessaire pour un individu de bien percevoir ces changements de couleur afin de pouvoir effectuer les divers tests demandés. Nous faisons une vérification en début d'expérience avec le sujet à l'aide du casque de visualisation qui présentait des éléments d'interfaces ayant des couleurs différentes.

Treize des quatorze sujets avaient déjà participé à une expérience précédente. Le

nouveau sujet avait très peu ou pas d'expérience dans l'utilisation de systèmes de réalité virtuelle. Les sujets ayant répondu à notre invitation ont été convoqués à tour de rôle sur une période d'une semaine, au rythme d'un sujet à l'heure. Un seul sujet était présent à la fois dans notre laboratoire d'expérimentation.

Comme pour les expériences passées, les sujets étaient payés au taux de 10\$ de l'heure. Ils devaient remplir le formulaire de consentement qui est donné à l'annexe 1.

6.2.4 Procédure

Au début de la séance d'expérience, chaque sujet était invité à remplir un court questionnaire au sujet de son âge, son genre et son expérience avec les systèmes informatiques en général et les systèmes RV. Par la suite, une brève présentation de la plateforme de tests RV était faite. Cette présentation était faite en deux étapes. En premier lieu, l'auteur de cette thèse plaçait le matériel RV sur lui, présentait au sujet de quelle manière procéder afin d'effectuer les diverses manipulations à l'intérieur de l'environnement RV et donnait des recommandations sur la façon d'effectuer les manipulations avec l'interface. La durée de cette introduction était d'environ cinq minutes. En second lieu, le sujet prenait place à son tour et plaçait l'équipement RV sur lui pour pouvoir pratiquer chaque manipulation de l'expérience durant une période de cinq minutes. Nous avons déterminé la durée du temps d'entraînement de manière à permettre à chaque sujet d'acquérir un confort et une aisance minimale dans la manipulation des interfaces. Aucune mesure n'était prise durant la période de pratique.

Une fois la période de pratique terminée, le sujet prenait une courte pause durant laquelle nous l'informions du fait que les essais subséquents seraient mesurés et de la marche à suivre afin d'obtenir des mesures fiables et valables. Pour cette expérience, nous faisions asseoir les sujets étant donné la durée accrue de l'expérience qui était de 75 minutes en moyenne, sans considérer la période d'introduction et de pratique. Nous avons déterminé le temps moyen d'expérimentation par l'entremise d'essais

préliminaires qui ont révélé que le temps requis avait pratiquement doublé par rapport aux deux expériences antérieures.

Les essais effectués par chaque sujet étaient regroupés en huit blocs de 15 essais, pour un total de 120 essais. Chacun de ces huit blocs représentait une des huit combinaisons de rétroaction visuelles étant évaluées dans cette expérience. À la fin de chaque bloc d'essais, une pause de quelques secondes nous permettait de demander au sujet de décrire ses impressions. À partir de la fin du deuxième bloc, nous lui demandions de comparer le cas présent avec celui du bloc précédent et de nous donner sa préférence. Toute autre remarque était consignée au registre par l'auteur de cette thèse.

Une fois les 120 mesures effectuées, le sujet enlevait l'équipement RV et prenait place à une table où nous lui demandions de remplir un court questionnaire. Celui-ci permettait de recueillir des données sur les variables suivantes :

- Satisfaction
 - Préférences concernant les rétroactions visuelles utilisées
- Fatigue
 - Échelle de Likert à 5 niveaux
 - Nulle (imperceptible)
 - Faible (au seuil de la perception)
 - Moyenne (équivalente à une activité de durée similaire)
 - Forte (difficultés de concentration)
 - Très élevée (causant des douleurs).
- Inconfort physiologique
 - Sensation de désorientation (absente / présente)
 - Sensation de nausées (absente / présente)
 - Maux de tête (absent / présent)
 - Troubles de la vue (absent / présent)

- Autres remarques formulées par le sujet (champ du questionnaire « commentaires » en style libre)

L'annexe 2 présente le questionnaire utilisé lors de l'expérience.

L'expérience a été conçue de manière à limiter le plus possible la fatigue des sujets. Pour ce faire, l'interface de la plateforme RV permettait au sujet de choisir lui-même le début de chaque essai en appuyant sur un bouton du panneau de dialogue de contrôle. Le sujet pouvait donc effectuer une courte pause entre chaque bloc d'essais. Par ailleurs, les mesures prises ont permis de tracer des courbes d'apprentissage qui peuvent être utilisées afin de déceler l'apparition de fatigue chez le sujet.

6.2.5 Variables de l'expérience

Les principales variables indépendantes mesurées sont la couleur, le système de visée et l'ombrage dynamique (indiqué par un P dans le tableau 6.2). Le genre du sujet a été considéré comme une variable indépendante secondaire (indiqué par un S dans le tableau 6.2), c.-à-d. une variable n'étant pas de l'intérêt principal de l'expérience dont l'existence est connue et qui doit être prise en compte étant donné l'impact qu'elle peut avoir sur les résultats.

Tableau 6.2 : Variables de l'expérience 3

Indépendante	Dépendante
1) couleur (P)	1) temps d'essai
2) système de visée (P)	
3) ombrage (P)	
4) genre du sujet (S)	

Dans cette expérience, le seul paramètre quantitatif mesuré est le temps total d'exécution de la tâche, que nous appelons le temps d'essai. Il a été comptabilisé et sauvegardé dans

un fichier informatique à la fin de chaque essai par la plateforme de test. Nous avons également évalué la satisfaction du sujet à l'aide du questionnaire proposé en fin d'expérience.

Le temps d'essai comprend l'intervalle de temps débutant au moment où la main de du sujet entre dans la zone active du panneau de dialogue (celui de la calculatrice) et se terminant au moment où le bon résultat est affiché sur l'écran. Cette zone forme un volume cubique invisible autour du menu. Ce volume était de dimensions fixes d'un essai à l'autre, permettant de s'assurer que pour chaque essai, les temps mesurés étaient effectués sur une même base de référence et indépendante de la distance initiale entre le sujet et le menu. Le volume avait les dimensions suivantes : 30 cm (largeur) x 20 cm (hauteur) x 7,5 cm (profondeur). La base de ce volume repose sur le plan de la surface du panneau de dialogue et s'étend 7,5 cm devant celui-ci. Comme la distance à parcourir n'est que de 7,5 cm avant d'atteindre le curseur, nous éliminons ainsi le temps relatif au parcours de la main avant d'arriver à proximité du menu. La position initiale de la main du sujet dans l'espace n'avait donc pas d'incidence sur les temps mesurés.

Nous cherchons à obtenir les temps d'essais les plus faibles, définissant les meilleures performances possible. C'est-à-dire : 1) la plus grande rapidité et 2) la plus grande aisance d'utilisation possible telle que perçue par l'utilisateur.

6.2.6 Le protocole expérimental

Le tableau 6.3 présente le sommaire du protocole expérimental de l'expérience 3. On y trouve le nombre de variables indépendantes testées ainsi que le nombre de cas testés dans le plan expérimental utilisé.

Tableau 6.3 : Sommaire du plan expérimental de l'expérience 3

Étude expérimentale	Nombre de variables indépendantes primaires	Nombre de variables indépendantes secondaires	Nombre de cas	Répétitions pour chaque cas	Nombre total d'essais par sujet	Durée approximative par sujet (minutes)	Nombre de sujets
Effet des rétroactions visuelles sur les performances	3	1	8	15	120	75	14

Les huit cas possibles sont présentés au tableau 6.4. Les rétroactions ont été mises en grisé lorsqu'elles sont inactives afin de faciliter la consultation du tableau.

Tableau 6.4 : Liste des cas possibles de combinaisons de rétroactions visuelles

Cas	Couleur	Système de visée v.2	Ombre v.2
1	sans	sans	sans
2	sans	sans	avec
3	sans	avec	sans
4	sans	avec	avec
5	avec	sans	sans
6	avec	sans	avec
7	avec	avec	sans
8	avec	avec	avec

L'ordre d'apparition des huit cas d'expérience présentés aux sujets a été volontairement randomisé de manière à contrebalancer les effets d'apprentissage d'un bloc d'essais à l'autre. L'ordre des cas utilisé est donné au tableau 6.5.

Tableau 6.5 : Ordre des cas pour l'expérience 3

Sujet	Ordre des cas							
1	8	4	6	3	1	7	2	5
2	2	7	1	6	3	4	8	5
3	1	3	2	5	6	8	7	4
4	7	6	3	4	8	5	2	1
5	2	4	7	8	1	5	3	6
6	4	5	3	8	2	7	6	1
7	3	2	6	8	4	1	5	7
8	2	8	4	6	3	5	1	7
9	4	5	6	8	2	1	7	3
10	2	5	1	6	4	3	8	7
11	7	6	2	5	4	1	8	3
12	3	5	8	6	4	2	1	7
13	2	1	8	7	6	5	3	4
14	3	5	6	1	8	7	4	2

6.3 Résultats

6.3.1 Données empiriques mesurées et statistiques descriptives

Le tableau 6.6 donne les statistiques descriptives relativement à l'effet des trois rétroactions visuelles sur le temps d'essai moyen. Les rétroactions inactives (valeur à 0) sont indiquées en grisé pour permettre au lecteur de voir plus facilement la répartition des rétroactions dominantes versus celles qui performant moins bien.

Tableau 6.6 : Effet des trois rétroactions visuelles sur le temps d'essai moyen (secondes)

Couleur	Système de visée v.2	Ombre v.2	Moyenne	Erreur std.	-95%	+95%	N
1	1	0	16,65	1,68	13,32	19,98	14
0	1	1	18,03	1,68	14,70	21,37	14
0	1	0	18,24	1,68	14,91	21,58	14
1	1	1	18,30	1,68	14,97	21,64	14
1	0	1	18,73	1,68	15,39	22,06	14
1	0	0	18,75	1,68	15,42	22,08	14
0	0	1	20,26	1,68	16,93	23,59	14
0	0	0	20,34	1,68	17,01	23,67	14

On observe que la meilleure performance est obtenue lors de l'utilisation simultanée de la couleur et du système de visée. On note également la forte dominance du système de visée qui est présent dans les quatre cas les plus performants. La couleur vient en second. Pour ce qui est de l'ombre, on observe une distribution plus uniforme des 0 et 1 indiquant une faible influence sur les temps moyens.

On note donc une forte amélioration des temps d'essais moyens pour la rétroaction du système de visée version 2 par rapport à la version précédente utilisée lors de l'expérience 2. Par contre, les modifications apportées à l'ombre ne semblent pas avoir amélioré les performances de façon significative.

6.3.2 Analyses de variance

Nous avons effectué une analyse de variance multifactorielle sur les données recueillies. Les résultats statistiquement significatifs ($p < 0.05$) ont été marqués en italique gras dans le tableau d'analyse. Comme le montre le tableau 6.7 donnant les résultats des analyses de variance, le genre des sujets et le système de visée ressortent comme les principaux facteurs affectant les temps d'essais moyens. Par contre, aucun facteur n'est statistiquement significatif. Nous pouvons malgré tout utiliser les résultats de cette

analyse de variance pour voir les tendances.

Tableau 6.7 : Analyse de variance des temps d'essai moyen

	SS	MS	F	p
Genre	81,69	81,69	2,0160	0,158888
Couleur	34,59	34,59	0,8535	0,357868
Sys. visée (v.2)	81,96	81,96	2,0225	0,158221
Ombres	3,12	3,12	0,0771	0,781899
Genre * Couleur	6,12	6,12	0,1510	0,698466
Genre * Sys. visée (v.2)	0,20	0,20	0,0049	0,944588
Couleur * Sys. visée (v.2)	5,68	5,68	0,1401	0,709018
Genre * Ombres	36,17	36,17	0,8926	0,347140
Couleur * Ombres	6,47	6,47	0,1596	0,690392
Sys. visée (v.2) * Ombres	4,18	4,18	0,1032	0,748691
Genre * Couleur * Sys. visée (v.2)	16,18	16,18	0,3992	0,529014
Genre * Couleur * Ombres	5,63	5,63	0,1390	0,710083
Genre * Sys. visée (v.2) * Ombres	11,27	11,27	0,2782	0,599090
Couleur * Sys. visée (v.2) * Ombres	5,69	5,69	0,1405	0,708613
Genre * Couleur * Sys. visée (v.2) * Ombres	64,37	64,37	1,5886	0,210577
Error	3890,12	40,52		
Total	4253,45			

Le genre et le système de visée sont les facteurs les plus influents avec des p de 0,158 et avec des F supérieurs à 2.0. On note également une influence due à une interaction des quatre facteurs simultanément, ce qui nous indique qu'il n'est pas possible de conclure avec force sur les effets simples de chaque facteur pris indépendamment.

Nous sommes donc en présence d'un phénomène complexe d'interaction entre l'ensemble des facteurs mesurés. Les prochaines sections nous permettront de mieux comprendre le comportement général du phénomène.

6.3.3 Performances en fonction du changement de couleur des éléments d'interface

Faisant abstraction des autres facteurs, les variations de performances en temps dues aux changements de couleur des éléments d'interface sont d'importance moyenne. La figure 6.5 montre que les temps d'essai moyens sont de 19.22 secondes sans la couleur et de 18.11 secondes avec la couleur, soit une différence de 1.11 seconde entre les deux conditions.

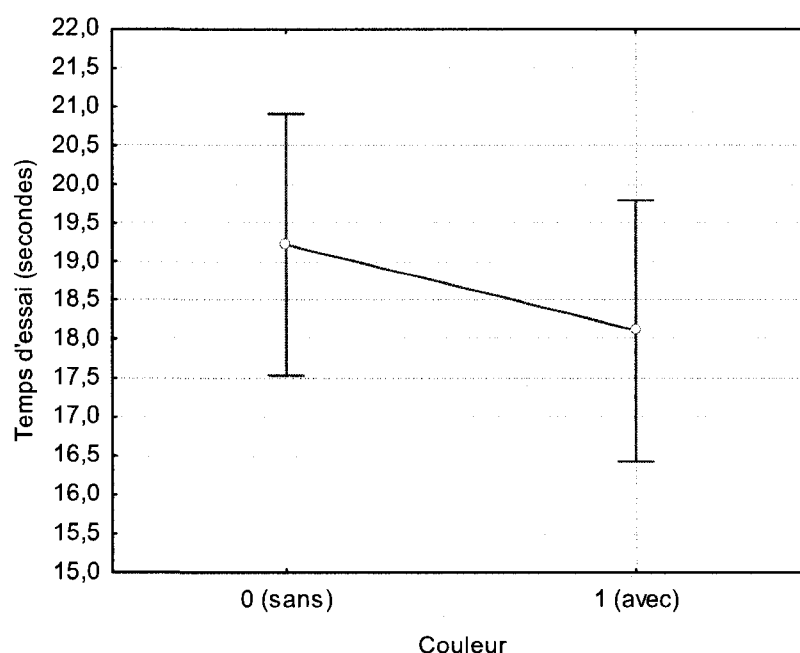


Figure 6.5 : Variation des temps d'essai moyens en fonction du changement de couleur

6.3.4 Performances en fonction de l'utilisation du système de visée

L'utilisation du système de visée a un impact encore plus prononcé que la couleur sur les temps d'essais. La figure 6.6 montre que les temps d'essai moyens sont de 19.52 secondes sans l'utilisation du système de visée et de 17.81 secondes avec le système de visée, soit une différence de 1.71 seconde entre les deux conditions.

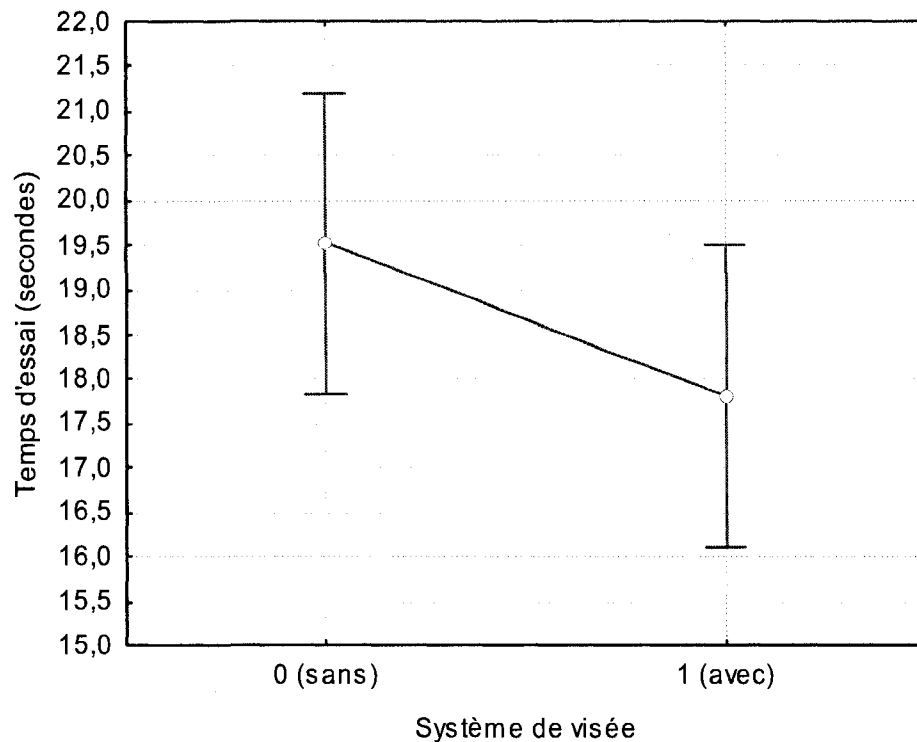


Figure 6.6 : Variation des temps d'essai moyens en fonction de l'utilisation du système de visée (version 2)

6.3.5 Performances en fonction l'utilisation de l'ombrage

L'ombrage est la seule rétroaction visuelle à avoir un effet négatif sur les performances de l'utilisateur malgré qu'elle semble la plus intuitive et la plus naturelle. La figure 6.7 montre que les temps d'essai moyens sont de 18.5 secondes sans l'utilisation de l'ombre et de 18.8 secondes avec le système de visée, soit une différence de 0.3 seconde entre les deux conditions.

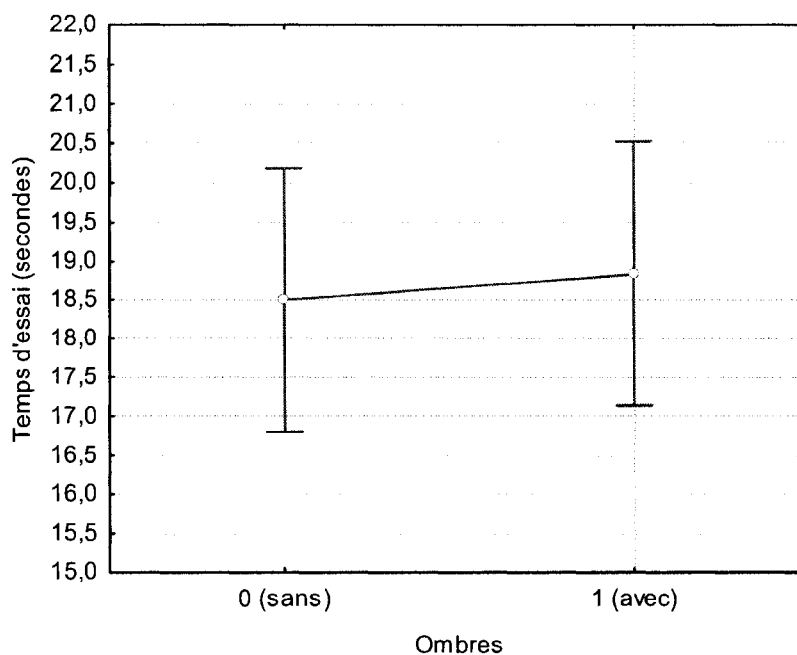


Figure 6.7 : Variation des temps d'essai moyens en fonction de l'utilisation de l'ombrage (version 2)

6.3.6 Courbe d'apprentissage

La figure 6.8 donne la courbe d'apprentissage des sujets établie en fonction de l'évolution des temps d'essai durant la séance expérimentale. L'apprentissage observé est rapide pour les neuf premiers essais pour ensuite atteindre un minimum vers le 10e essai. Cela montre que le nombre d'essais utilisé pour cette expérience est approprié. Cela dénote également que l'utilisation du système RV requiert un certain apprentissage avant que l'utilisateur devienne confortable avec les manipulations à effectuer.

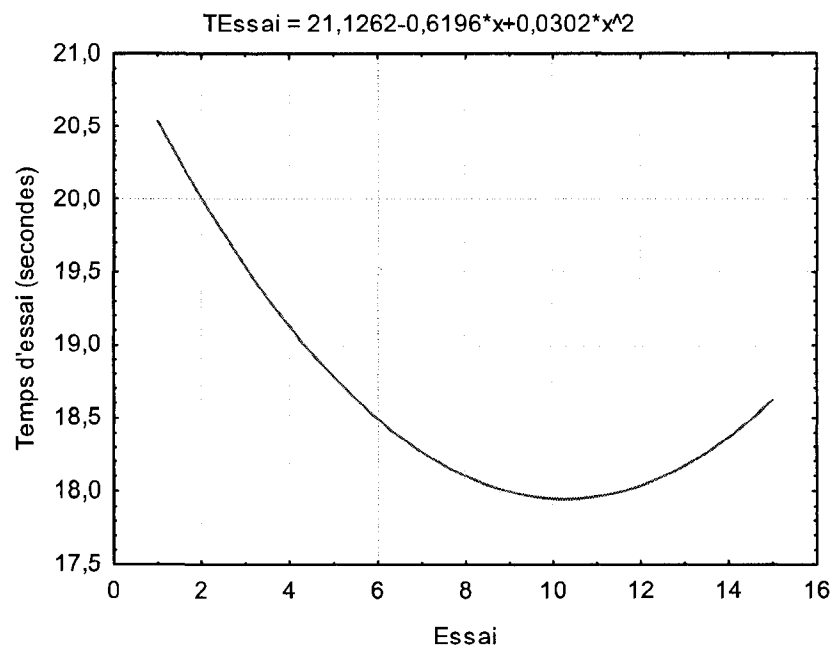


Figure 6.8 : Courbe d'apprentissage en fonction des temps d'essai

La fatigue, identifiable par la portion de la courbe entre les essais 10 et 15, semble plus élevée que pour les deux expériences précédentes. Par contre, si l'on tient compte du fait que l'expérience 3 requiert en réalité huit manipulations¹ par essai plutôt qu'une seule, on peut comprendre que les temps d'essais pour cette tâche seront plus grands que pour les deux expériences précédentes et en proportion avec le nombre plus élevé de manipulations requises.

6.3.7 Différences attribuables au genre

Le genre des sujets influence fortement les performances globales de l'utilisateur comme nous l'avons noté dans les résultats de l'analyse de variance. Comme pour les expériences précédentes, les femmes sont en général moins rapides que les hommes avec

¹ Par manipulation on entend ici une succession de mouvements de la main composée de translations de la main, du déplacement du doigt vers la cible, du touché de la cible (un bouton par exemple) et du relâchement de celle-ci. L'ensemble de ces actions est compté comme une manipulation.

des temps d'essai moyens de 19.52 secondes pour les femmes versus 17.81 secondes pour les hommes. L'écart de performance est donc de 1.71 seconde en moyenne par essai.

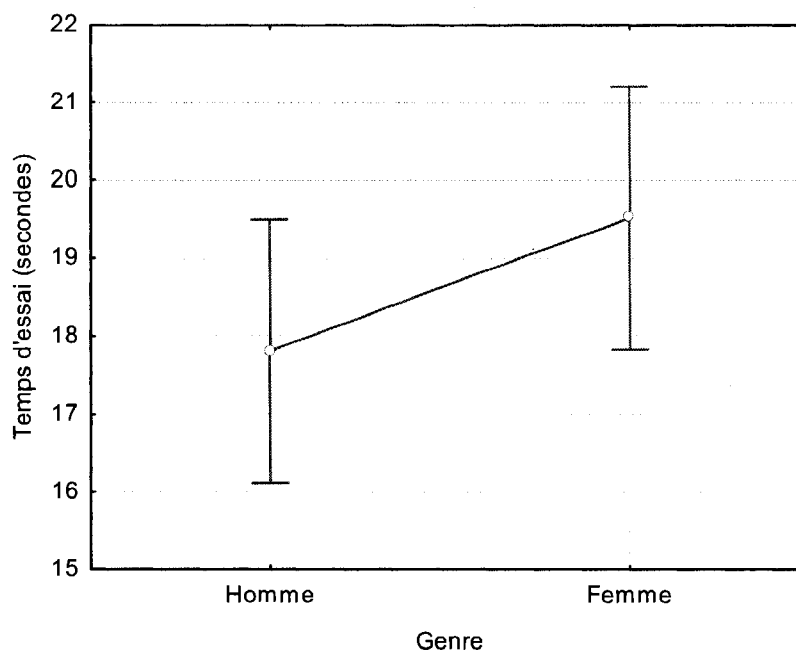


Figure 6.9 : Temps d'essai en fonction du genre

6.3.8 Analyse des gains en performance

À partir des temps d'essais recueillis, nous obtenons le temps moyen d'un essai, soit 18.5 secondes. Ceci nous permet de déterminer les gains de performances en fonction des facteurs étudiés, le gain étant calculé ainsi :

$$\text{Gain} = \frac{\text{Écart des temps d'essai}}{\text{Temps moyen d'un essai}} \quad \text{Eq. 4}$$

Le tableau 6.8 donne les résultats pour chaque facteur.

Tableau 6.8 : Gains en performance attribuables aux rétroactions visuelles

Facteur	Écarts	Gain
Système de visée (v.2)	$19.5 - 17.8 = 1.7$	9.2%
Couleur	$19.2 - 18.1 = 1.1$	5.9%
Ombrage (v.2)	$18.5 - 18.8 = -0.3$	-1.6%
Couleur + Système visée (v.2)	$20.3 - 16.7 = 3.6$	19.5%

Chacun des gains indiqués dans le tableau 6.8 donne la différence de performance observée en pourcentage selon qu'une rétroaction visuelle donnée soit présente ou non lors des manipulations des interfaces. Les trois premiers résultats donnent les gains pour une seule rétroaction, indépendamment des autres. Le quatrième résultat indique le gain de performance global dans le meilleur cas, c.-à-d. lorsque la couleur et le système de visée sont actifs et que l'ombre est inactive. Des gains de 19.5 % sont donc réalisables par une utilisation judicieuse de ces deux rétroactions visuelles combinées. La figure 6.10 nous donne des réponses supplémentaires quant aux combinaisons optimales de ces rétroactions visuelles.

Ces gains sont très appréciables dans un contexte d'utilisation pratique. Par exemple, sur une session d'utilisation d'un système RV d'une durée de une heure, un utilisateur verra son temps d'utilisation réduit à 48.3 minutes s'il utilise des interfaces utilisant la combinaison optimale de rétroactions visuelles décrite plus haut par rapport à un utilisateur n'utilisant aucune rétroaction visuelle. Cela constitue un gain de 11.7 minutes, ce qui est énorme.

La figure 6.10 montre que dans le cas où l'ombre est inactive, l'utilisation de la couleur ou du système de visée entraîne des gains supplémentaires de performance. Par contre, lorsque l'ombre est active, l'ajout de la couleur procure un gain de performance uniquement en l'absence du système de visée.

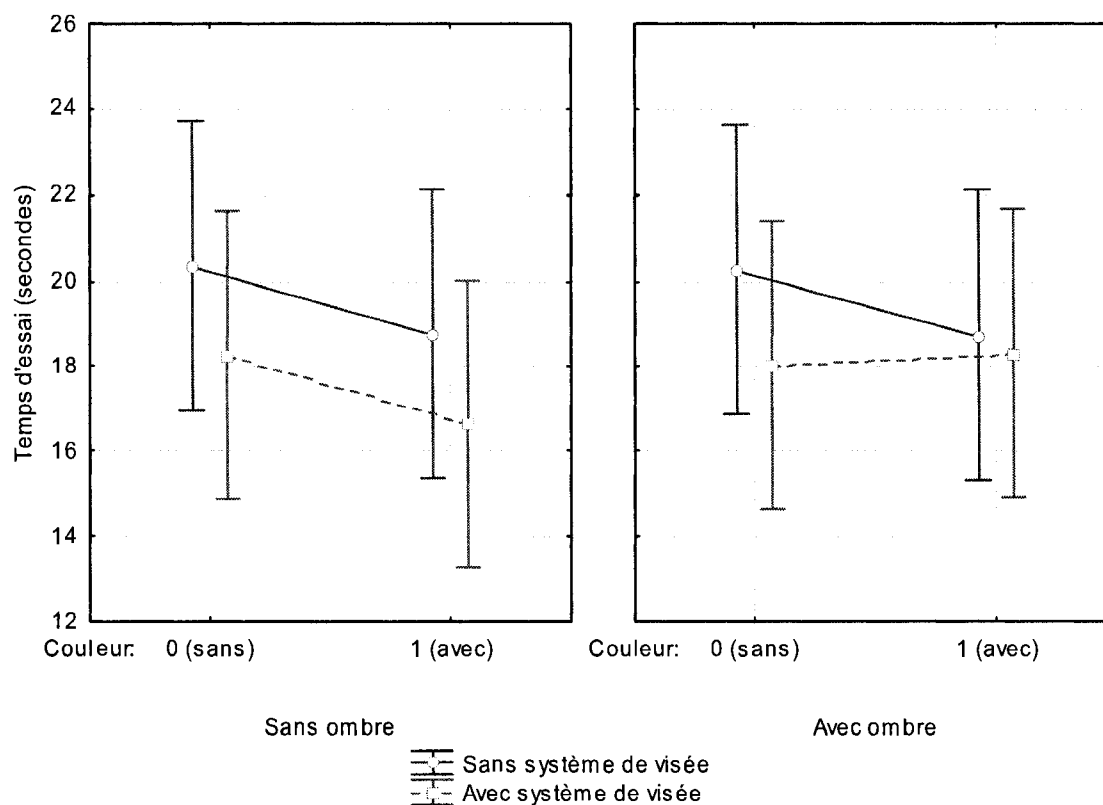


Figure 6.10 : Temps d'essai moyens en fonction de la couleur, du système de visée (version 2) et de l'ombre (version 2)

La pire performance est observée lorsqu'aucune rétroaction n'est présente comme nous l'avions prévu. À l'autre opposé, la meilleure performance est observée lorsque la couleur et le système de visée sont utilisés, sans l'ombre. Le tableau 6.9 donne le classement de chaque combinaison de rétroactions visuelles dans l'ordre croissant des performances.

On observe que le facteur « ombre » n'a pas d'impact réel car la répartition des valeurs 0 (absent) et 1 (présent) est uniformément répartie. Le facteur « couleur » semble désirable, mais la répartition des 0 et des 1 n'est pas bien définie. Par contre, pour le facteur « système de visée », il est actif pour toutes les instances les plus performantes et absent pour les instances les moins performantes. Ceci nous indique clairement que le système de visée est un facteur hautement désirable dans une interface RV où les

interactions sont nombreuses. Ceci indique également une augmentation de performance importante entre les systèmes de visée version 1 et version 2, ce qui démontre que l'ajout du cercle fut un succès.

Tableau 6.9 : Temps d'essai en fonction des rétroactions visuelles utilisées

Couleur	Système de visée v.2	Ombre v.2	Temps d'essai
1	1	0	16,65
0	1	1	18,03
0	1	0	18,24
1	1	1	18,30
1	0	1	18,73
1	0	0	18,75
0	0	1	20,26
0	0	0	20,34

Qu'en est-il des combinaisons de facteurs? En l'absence du facteur « système de visée » comment devrait-on agencer les autres rétroactions visuelles? Clairement, l'ombre seule nuit grandement aux performances des sujets. Par contre, la couleur permet un gain appréciable. Lorsque le système de visée est actif, l'ombre donne un léger gain de performance si la couleur est absente. Dans le cas où la couleur et le système de visée version 2 sont tous deux actifs, l'ombre version 2 a un effet négatif sur les performances.

En terminant, considérant les deux grands gagnants, soit le système de visée et la couleur, on observe que l'utilisation conjointe du système de visée et de la couleur est souhaitable. L'activation des couleurs lorsque le système de visée est actif permet de faire passer les temps d'essais de 18.24 à 16.65 secondes. Ce qui est semblable au gain fait entre le cas où il n'y a aucune rétroaction (20.34 secondes) et le cas où seulement le système de visée est actif (18.24 secondes).

6.3.9 Résultats qualitatifs

Les résultats qualitatifs se répartissent en deux groupes. Il y a d'abord les informations subjectives recueillies sous forme de commentaires verbaux entre chaque essai d'expérience et d'observations faites par l'auteur de la thèse. Le second groupe de résultats quantitatifs provient des réponses recueillies par l'entremise du questionnaire donné à l'annexe 2.

Le tableau 6.10 donne une compilation des principaux commentaires des sujets et des observations faites par l'auteur de la thèse tout au long de l'expérience. Ceux-ci sont classés selon le nombre d'occurrences de chacun. Il est à noter que les commentaires faits par les sujets dans le tableau 6.10 ont été reformulés par l'auteur de cette thèse de manière à regrouper ceux qui semblaient équivalents.

Tableau 6.10 : Commentaires faits par les sujets et des observations faites par l'auteur de la thèse lors des séances d'expérience

Commentaire	Nombre d'occurrences	Occurrence en %
Le sujet ne porte pas attention ou ne voit pas l'ombre.	12	15,00%
C'est plus pénible sans aucune aide.	10	12,50%
Il faudrait une confirmation visuelle d'un clic de bouton (flash de l'écran de la calculatrice). Il faudrait un effet graduel quand on enfonce les boutons pour sentir quand on enfonce le bouton.	6	7,50%
Système de visée + couleur c'est bien.	5	6,25%
Le cercle m'aide (système de visée).	5	6,25%
C'est difficile juste avec les couleurs car on a l'impression de sélectionner quand ça passe au jaune.	3	3,75%
L'ombrage seul c'est difficile.	3	3,75%
Les trois rétroactions c'est trop d'information.	3	3,75%
J'aime mieux l'ombre que le cercle car moins distrayant ou plus intuitif.	3	3,75%
L'ombre + système de visée est plus facile.	2	2,50%
L'expérience 3 est beaucoup plus exigeante.	2	2,50%

Tableau 6.10 : Commentaires faits par les sujets et des observations faites par l'auteur de la thèse lors des séances d'expérience (suite et fin)

Commentaire	Nombre d'occurrences	Occurrence en %
Beaucoup plus facile avec les 3 actifs (vs. Aucune rétroaction).	2	2,50%
L'ombre est utile quand il n'y a pas de système de visée.	2	2,50%
L'ombre + couleur est équivalent au système de visée + couleur.	2	2,50%
Ça prend la couleur plus autre chose.	2	2,50%
J'aime encore mieux juste le système de visée. Ça donne toute l'info utile en plus condensée.	2	2,50%
J'utilise le fait que le menu tombe en transparence pour savoir quand je passe à travers » (j'ai enfoncé le bouton).	2	2,50%
Le cercle prend le dessus sur les autres rétroactions. Je me concentre principalement sur le cercle.	2	2,50%
Je me concentre plus sur la couleur que le cercle.	2	2,50%
L'ombre me dérange / distrais.	2	2,50%
Le sujet se souvient systématiquement de certaines équations mais pas d'autres.	1	1,25%
L'ombre donne une information plus graduelle qu'un changement de couleur discret (subi).	1	1,25%
Juste le cercle c'est plus difficile.	1	1,25%
Le contraste de l'ombre rend son utilisation difficile.	1	1,25%
Il faut une des deux aides "spatiales" (ombre ou cercle).	1	1,25%
Le changement de transparence du menu me nuit.	1	1,25%
J'aime le changement de couleur.	1	1,25%
La couleur seule demande moins d'efforts que le cercle ou l'ombre seul.	1	1,25%

Ce que nous concluons suite aux commentaires et aux observations les plus fréquentes est que :

1. dans bien des cas, les sujets ne remarquent pas la présence de l'ombre dans la scène;
2. l'absence de rétroactions visuelles rend les interactions difficiles;

3. les rétroactions utilisées lors de cette expérience ne donnent pas suffisamment d'information sur l'enfoncement d'un bouton;
4. le système de visée (version 2) apporte une aide significative à la manipulation des IHM RV

La troisième remarque met en évidence que notre calculatrice virtuelle ne recréait pas suffisamment fidèlement une calculatrice réelle. Elle souligne également l'importance que les sujets portent au réalisme des IHM qu'ils manipulent. Ils veulent que ces IHM se comportent de manière aussi fidèle que possible que leurs équivalents du monde réel auxquels ils sont habitués.

Certains commentaires vont dans le sens que différentes combinaisons de rétroactions aident les interactions (ex. : « L'ombre + couleur est équivalent au système de visée + couleur », « Ça prend la couleur plus autre chose »). Un autre commentaire similaire exprimé par les sujets est qu'en l'absence de certaines rétroactions, d'autres rétroactions moins efficaces sont préférables à ne rien avoir du tout (ex. : « L'ombre est utile quand il n'y a pas de système de visée »).

Comme ce fut le cas lors de la deuxième expérience, certains sujets expriment le sentiment que l'ombre les aide de manière efficace, même si dans les faits, ce n'est pas nécessairement le cas. Nous devons donc prendre en considération le fait que certaines rétroactions peuvent être désirables même si elles n'apportent pas de gains de performance mesurables. Nous croyons que le cas de l'ombre montre que certaines rétroactions procurent un niveau de satisfaction positif chez l'utilisateur en fournissant une rétroaction naturelle et connue. Les sujets ont démontré un intérêt marqué pour les méthodes d'interactions naturelles comme les manipulations bimanuelles (menu tenu par la main non dominante) et l'ombre au cours des trois expériences de cette étude. La performance basée sur la rapidité d'exécution n'est donc pas le seul facteur à prendre en considération lors du design d'une IHM pour SRV conviviale du point de vue humain.

A la fin de l'expérience, chaque sujet était invité à répondre à un questionnaire nous permettant de voir si les données quantitatives mesurées concordent avec les impressions subjectives des sujets. Les tableaux qui vont suivre donnent le sommaire des réponses perçues auprès des sujets.

Nous avons demandé à chacun des sujets de nous indiquer leurs préférences au sujet des rétroactions visuelles. Nous leurs avons demandé de les classer par ordre d'importance de un à trois, un étant la préférée et trois la moins appréciée. Le tableau 6.11 donne la compilation des données. Il est à noter que certains sujets n'ont pas donné de classement pour chacun des trois rangs ce qui fait que les totaux pour chaque colonne ne sont pas nécessairement égaux.

Tableau 6.11 : Préférence des sujets relative à la rétroaction visuelle

	rang		
	1	2	3
Système de visée v.2	9	3	2
Couleur	2	9	3
Ombre	3	2	4

Le tableau 6.11 donne le nombre de fois que chaque rétroaction visuelle a été choisie, et ce, pour trois niveaux de préférences. Le premier rang correspond à la rétroaction que le sujet a préférée. Les deuxième et troisième rangs correspondent à des niveaux de satisfactions moindres du sujet face à une rétroaction visuelle donnée. Par exemple, pour le système de visée, on note que neuf personnes l'ont placée au premier rang, trois personnes au deuxième rang et deux personnes à troisième rang. La figure 6.11 permet une analyse plus aisée et rapide de ces résultats.

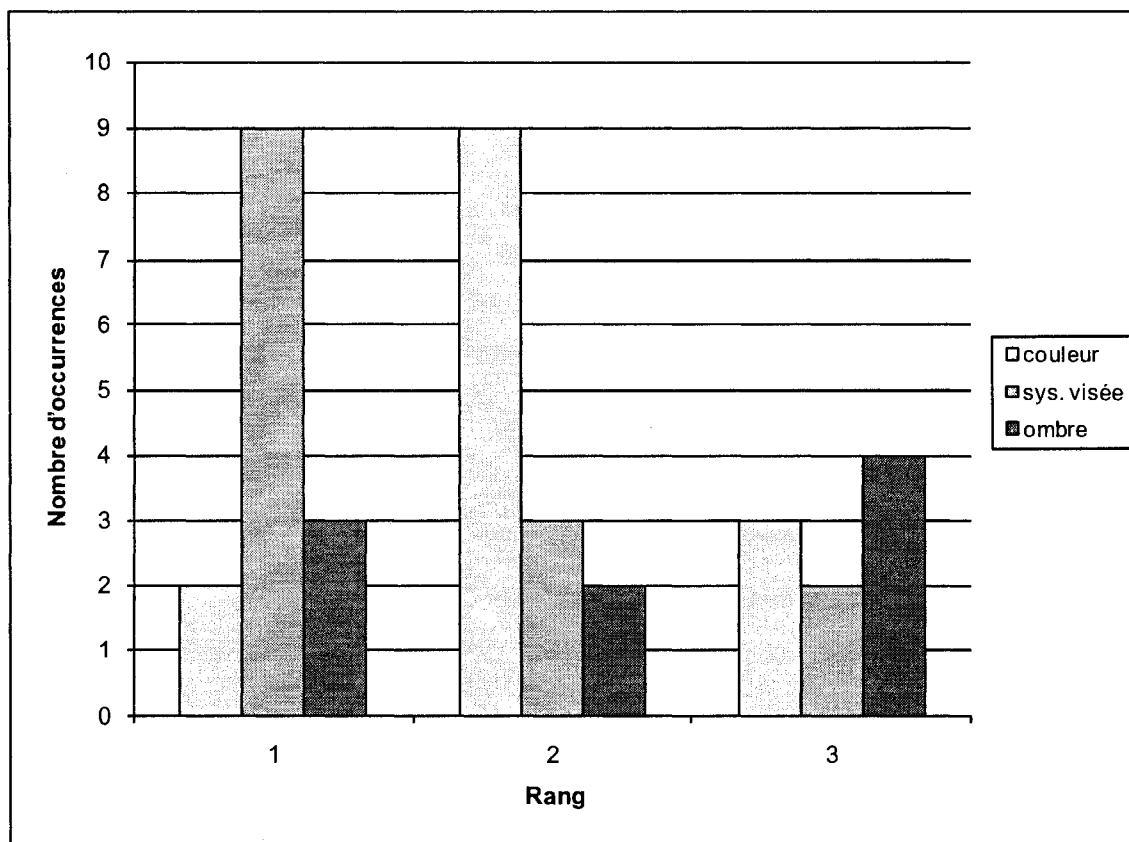


Figure 6.11 : Préférence des sujets relative à la rétroaction visuelle

Le graphique permet de voir que les résultats obtenus à partir des données qualitatives concordent bien avec les données quantitatives observées. La rétroaction visuelle jugée la plus utile est le système de visée version 2, suivie de la couleur et finalement de l'ombrage version 2 au dernier rang. On constate que le système de visée décroît du rang un vers le rang trois, ce qui indique qu'il est celui qui tend le plus vers une valeur moyenne vers le premier rang. La couleur suit au second rang et l'ombre termine au troisième rang avec une répartition relativement uniforme, mais avec une plus forte concentration d'occurrences au troisième rang. On note également que l'ombre, malgré son plus faible nombre d'occurrences, est majoritairement classée en première ou en troisième position, dénotant une plus grande divergence des opinions en ce qui la concerne. Soit les gens aiment l'ombre, soit ils ne l'aiment pas vraiment ou pas du tout.

D'autres données sur la fatigue et le confort du sujet ont été recueillies. Les résultats indiquent que l'utilisation du système RV ne causait pas de fatigue ou de charge cognitive inhabituelle. Le tableau 6.12 donne la compilation des résultats obtenus.

Tableau 6.12 : Résultats qualitatifs sur le niveau de fatigue des sujets

niveau de fatigue	Occurrences	Occurrences en %
0 - nulle	2	14%
1 - faible	4	29%
2 - moyenne	6	43%
3 - forte	2	14%
4 - extrême	0	0%

Les niveaux de fatigue rapportés par les sujets sont supérieurs à ceux rapportés lors des expériences 1 et 2, ce qui concorde avec leurs commentaires et avec nos attentes puisque l'expérience 3 a une durée moyenne trois fois supérieure aux deux expériences précédentes.

Tableau 6.13 : Liste des symptômes perçus par les sujets

Symptômes	Occurrences	Occurrences en %
maux de tête	3	37,5%
étourdissements	3	37,5%
vision floue	2	25,0%
fatigue musculaire	0	0,0%

Nous avons aussi demandé aux sujets de nous indiquer, s'il y a lieu, les sensations d'inconfort perçues à la fin de la séance d'expérimentation.

Les principaux symptômes notés sont des maux de tête ainsi que des étourdissements. On observe plus de symptômes rattachés à l'effort cognitif que ce fut le cas pour les expériences 1 et 2. L'intensité de ces symptômes est également supérieure, comme nous l'avons observé avec les résultats du niveau de fatigue donnés au tableau 6.12, avec deux occurrences de fatigue de niveau 3 (forte) comparativement à aucune occurrence pour les deux expériences précédentes.

6.4 Discussion

6.4.1 Rétroaction visuelle optimale

En se basant sur les résultats d'analyses statistiques descriptives, le système de visée version 2 semble être la rétroaction visuelle procurant les meilleures améliorations de performance chez l'utilisateur. Encore ici, il faut nuancer ces résultats car les analyses de variances n'étaient pas statistiquement significatives. Les résultats des statistiques descriptives nous encouragent toutefois à poursuivre dans cette direction de recherche.

Lors de la deuxième expérience, la rétroaction du système de visée était jugée moins utile alors que la couleur l'emportait comme la rétroaction favorite des sujets. Il apparaît donc que les améliorations apportées au système de visée version 2 ont permis une amélioration notable des performances humaines. Ceci est un succès important pour nous car notre contribution innovatrice dans le cadre de cette thèse, le système de visée, ressort comme l'élément ayant globalement contribué aux plus grandes améliorations de performances humaines pour les IHM pour SRV. Ceci met également en évidence que nous sommes dans une bonne direction en ce qui concerne l'amélioration de performances en poursuivant avec l'approche du système de visée. Ces résultats nous permettent effectivement de pointer dans une direction plus précise en ce qui a trait aux futures recherches sur l'amélioration des performances des utilisateurs de systèmes RV. Cela dit, il faut garder à l'esprit que les analyses de variances ne permettent pas de confirmer que les augmentations de performances observées sont statistiquement

significatives. Il faudrait donc investiguer davantage avant de conclure de manière définitive.

6.4.2 Considérations relatives au genre des sujets

Les observations de l'expérience 3 confirment celles que nous avons faites lors des expériences 1 et 2. Les femmes ont été plus lentes que les hommes à compléter la tâche demandée. L'écart moyen est de 1.7 seconde ce qui est une différence notable. Par contre, il faut remettre cet écart dans son contexte. Comme la tâche de l'expérience 3 consiste en une succession de multiples répétitions de tâches du type de celles demandées à l'expérience 2, il est normal que les écarts de temps soient plus élevés. De manière générale, nous avons observé que les femmes ont un souci plus grand que les hommes de bien faire la tâche, ce qui peut effectivement augmenter les temps de manipulation. Il est clair qu'il faudra tenir compte du genre des utilisateurs lors de l'analyse globale des performances relatives aux interfaces virtuelles. Nos résultats semblent en concordance avec des résultats obtenus dans d'autres recherches ayant trait à la capacité de travailler avec des données tridimensionnelles chez les deux genres.¹

6.4.3 Préférences de l'utilisateur versus résultats d'analyse

Dans cette expérience, les résultats quantitatifs et qualitatifs concordent bien. Dans l'ensemble, les sujets ont préféré la rétroaction du système de visée version 2 aux deux autres rétroactions visuelles en la classant majoritairement en première position. Le changement de couleur des interfaces a principalement été classé en seconde position. L'ombre version 2 a été perçue comme n'apportant pas de réels bénéfices ou même comme étant nuisible par la majorité des sujets. Pour l'expérience 3, on constate un certain niveau d'ambiguïté face à l'ombre. Le nombre de votes pour l'ombre a été relativement uniformément réparti suivant les trois rangs possibles. Quelques sujets l'ont

¹ Geary, D. C., & DeSoto, M., C. (2001). Sex differences in spatial abilities among adults from the United States and China: Implications for evolutionary theory. *Evolution and Cognition*, 7, 172-177.

même classé au premier rang alors que d'autres au troisième rang. L'aide réelle qu'elle apporte aux sujets dans la réalisation de la tâche n'est pas claire aux yeux des sujets. Quelques sujets ont effectivement mentionné que l'ombre semblait trop « pâle » ou manquait de contraste pour être vraiment utile. Par opposition, on observe que les rétroactions qui offrent des forts contrastes de couleurs sont perçues comme plus efficaces par les utilisateurs.

6.5 Conclusion

Cette troisième expérience nous a permis de tester l'efficacité des trois rétroactions sur une tâche plus variée et plus longue que celle des deux premières expériences. Nous avons apporté des modifications fonctionnelles importantes au système de visée et à l'ombre.

Sur la base des statistiques descriptives et les commentaires subjectifs des sujets, le système de visée version 2 ressort comme la rétroaction permettant les meilleurs gains de performance humaine et apportant une augmentation notable de performances suite au passage de la version 1 à la version 2. Les résultats semblent indiquer que ce type de rétroaction constitue une voie de recherche prometteuse pour le futur des IHM de SRV. Nous devons toutefois garder à l'esprit que les résultats des analyses de variance ne sont pas statistiquement significatifs, ne permettant donc pas d'établir avec certitude que les gains que nous avons identifiés sont reproductibles. Par ailleurs, une analyse soignée des résultats présentés au tableau 6.7 permet de détecter une certaine influence du facteur « système de visée » sur les performances. La probabilité que la différence de performance soit attribuable au hasard n'est que de 15% pour ce facteur, ce qui est similaire au pourcentage obtenu pour la distinction entre les genres. Comme il a été montré que le genre a un impact statistiquement significatif lors des expériences 1 et 2, il apparaît plausible qu'un échantillon plus grand aurait permis de détecter un impact significatif de certains modes de rétroaction comme le système de visée.

Compte tenu de nos observations, les rétroactions artificielles comme les changements de couleur et le système de visée, par opposition aux rétroactions naturelles comme la main virtuelle et l'ombre s'avèrent plus efficaces pour communiquer des informations importantes à l'utilisateur. Si l'on regarde le fonctionnement et l'apparence visuelle de ces rétroactions, on remarque les choses suivantes :

- le système de visée affiche des informations de manière abstraite (lignes et cercles de dimensions variables en fonction d'une certaine logique);
- le changement de couleur est fortement contrasté de manière à produire des changements d'états aisément visibles dans la scène observée;
- l'ombre est subtile et passe d'un état de transparence totale à de semi-transparence sur des surfaces et des IHM, situées à proximité de la main virtuelle.

On remarque qu'il y a une progression de l'abstrait vers le concret suivant les trois rétroactions ci-haut. On ne peut dire ou conclure que la nature abstraite est ce qui rend l'interface plus efficace, mais il semble y avoir un lien entre la nature de l'interaction et les performances. Le contraste visuel semble une autre bonne piste à cet égard. Le système de visée, malgré sa nature plus abstraite, fournit des informations essentielles sur la position, l'orientation et la distance de la main de l'utilisateur par rapport au panneau de dialogue. Malgré qu'il y ait une certaine charge cognitive associée à ce mode de rétroaction, l'utilisateur apprend vite à exploiter ces informations afin de rapidement atteindre une cible dans un espace à trois dimensions. La ligne perpendiculaire est très visible et contrastée par rapport au reste de la scène, décrivant un chemin à suivre ainsi que la distance à parcourir. Toute cette information est contenue dans cette simple ligne. Le cercle de dimensions variables offre une confirmation ou une redondance de l'information afin de permettre à l'utilisateur de toujours disposer de cette information, peu importe l'angle de vue.

Le changement de couleur offre également de forts contrastes visuels, mais il ne fournit pas autant d'informations que le système de visée. Contrairement au système de visée, les changements de couleur sont discrets et ne permettent donc pas de visualiser la position, l'orientation et la distance à parcourir restante avant d'atteindre la cible. L'information est donnée de manière indirecte et implicite contrairement au système de visée où elle est directe et explicite. Le fait de donner une rétroaction implicite implique en fait une charge cognitive plus élevée, car plus d'effort d'interprétation est requis pour déduire les informations qui ne sont pas explicitement affichées.

L'ombre est la plus naturelle des trois rétroactions visuelles. Malgré que cette rétroaction réplique de très près le comportement naturel d'une ombre dans une scène, elle ne donne pas l'information de distance spatiale aussi directement que le système de visée. Comme c'est le cas pour le changement de couleur, l'utilisateur doit cognitivement intégrer les indices visuels que produit l'ombre pour déduire la distance, mais cette information n'est pas donnée de manière explicite.

La force de la rétroaction du système de visée réside donc dans le fait qu'elle est la seule à explicitement donner la solution au problème visé, c.-à-d., fournir à l'utilisateur la solution au problème d'évaluation de la distance entre la main virtuelle et la cible. Le système de visée est la seule rétroaction testée qui donne une information spatiale complète, suivant les trois axes x , y et z , de la relation entre la position de la main de l'utilisateur et la position de l'élément d'IHM. Le changement de couleur donne une information de « proximité suffisante » de la main en relation avec les IHM mais ne donne pas la distance elle-même. L'ombre donne une information indirecte de la distance, mais la qualité de cette information est inférieure à celle du système de visée en termes de lisibilité et d'effort cognitif requis.

Ceci nous permet de conclure qu'un ingrédient fondamental permettant de créer des interfaces efficaces est d'explicitement donner la solution du problème à l'utilisateur, de manière visuelle et claire.

Se basant sur nos observations et les résultats obtenus lors de cette troisième expérience, nous pouvons formuler les recommandations suivantes relatives aux rétroactions visuelles :

- Utiliser des rétroactions visuelles qui affichent visuellement et explicitement la solution à un problème qui devrait autrement être résolu mentalement par l'utilisateur.
- S'assurer que la rétroaction n'est pas invalidée par des contraintes d'occlusions produites par un élément de la scène comme la main virtuelle par exemple.
- Utiliser des rétroactions visuelles ayant un fort contraste de couleur.
- Étant donné la difficulté supplémentaire ajoutée par l'utilisation d'un environnement à trois dimensions, utiliser des rétroactions visuelles qui aident l'utilisateur à se repérer dans l'espace en établissant des points de références entre les objets d'interface avec lesquels il doit interagir.
- Éviter de combiner plusieurs rétroactions visuelles qui offrent les mêmes informations pour limiter les surcharges cognitives inutiles.

CHAPITRE 7 - CONCLUSIONS ET AVENUES DE RECHERCHE FUTURES

7.1 La thèse

L'objectif de cette thèse était de faire avancer les connaissances sur la conception et l'utilisation d'interfaces humaines - machine adaptées aux environnements de réalité virtuelle. Plus spécifiquement, nous avons concentré nos efforts sur l'utilisation de métaphores visuelles composées de panneaux de dialogue et de widgets 3D. Ces derniers peuvent prendre différentes formes comme des boutons, des gradateurs linéaires à glissière ou rotatifs, des cadrans d'affichages analogiques (à aiguille) ou numériques.

Nous avons tout d'abord effectué une revue de littérature afin de déterminer l'état d'avancement actuel des connaissances sur les IHM de systèmes de RV. Nous avons constaté qu'il existait un manque de connaissances et de résultats scientifiques sur l'utilisation de métaphores visuelles comme le panneau de dialogue et les éléments d'interfaces que l'on place sur ceux-ci. Cela nous est apparu comme une opportunité importante de recherche, car cette catégorie d'IHM pour SRV offre à notre avis un fort potentiel d'amélioration de l'aisance d'utilisation des SRV. En fait, les IHM à base de métaphores visuelles offrent la possibilité de globalement changer l'utilisation que nous faisons de la RV en permettant de réaliser des SRV offrant un plus haut degré de convivialité entre l'humain et la machine que par le passé. Les SRV actuels souffrent d'un manque de support pour des IHM évoluées qui fait en sorte que les utilisations que nous faisons des SRV restent marginales. Nous sommes d'avis que les IHM évoluées qui utiliseront des métaphores visuelles telles que les panneaux de dialogue permettront d'effectuer des tâches beaucoup plus complexes à l'intérieur d'un SRV que ce qui est présentement possible.

Nous nous sommes intéressés à trois problèmes en particulier qui affectent l'utilisation des IHM des systèmes de RV :

- le manque de données empiriques concernant l'effet du repère sur les performances de manipulation des panneaux de dialogue contenus dans un SRV.
- la difficulté d'interagir avec des IHM à l'intérieur d'un SRV dû à l'absence de rétroaction tactile provenant du dispositif d'entrée.
- le manque de résolution ou de précision des dispositifs d'entrée / sortie RV peut significativement réduire les performances de manipulations d'IHM à l'intérieur d'un EV.

Pour réaliser notre objectif et résoudre ces problèmes, nous avons développé une plateforme RV de test modulaire et réutilisable. Cette plateforme permet l'enregistrement automatique du temps écoulé entre divers points d'intérêt stratégique lors des manipulations. Elle permet aussi l'enregistrement d'écarts de positions entre des points dans l'espace. La plateforme a été développée de manière à fonctionner avec des équipements RV comme un casque immersif et un système de suivi de position à six degrés de liberté. Cette infrastructure matérielle permet de suivre les mouvements des mains et de la tête de chaque sujet et de leur montrer une scène à trois dimensions et stéréoscopique de l'environnement virtuel.

Nous avons utilisé cette plateforme de test pour nos trois expériences en exploitant la modularité de celle-ci pour l'adapter aux exigences spécifiques de chaque expérience. Des panneaux de dialogue ont été ajoutés à la plateforme pour répondre aux exigences de chaque expérience. Un de ces menus permettait le contrôle des essais par le sujet lui-même et affichait des informations sur l'évolution de l'expérience. D'autres panneaux de dialogue ont été ajoutés pour contenir des éléments d'interfaces avec lesquels les sujets ont été appelés à effectuer des manipulations spécifiques. Pour les deux premières expériences, un panneau de dialogue comportant un gradateur linéaire horizontal a été utilisé pour mesurer la performance humaine en fonction de différentes variables. Pour la troisième expérience, une calculatrice a été implantée sur un panneau de dialogue

permettant son utilisation dans un espace à trois dimensions.

Une main virtuelle affichée par la plateforme RV et représentant la position de la main réelle du sujet était affichée dans l'environnement virtuel afin d'offrir une corrélation entre les mondes réels et virtuels de manière à ce que le sujet en vienne à ressentir une impression d'immersion.

En plus de la plateforme RV, nous avons développé une nouvelle métaphore visuelle que nous avons nommée le « système de visée ». La mise au point de cette rétroaction visuelle a été fondée sur nos observations avec les sujets relativement à la difficulté à évaluer la position exacte de la main par rapport aux éléments d'interfaces affichés dans la scène. Nous sommes arrivés avec le concept consistant à visuellement afficher la distance entre la main et les IHM. Nous avons également tenu compte du fait qu'il y a des risques d'occlusions des IHM par la main elle-même. Le système de visée a été conçu de manière à offrir une solution visuelle suivant un angle de regard arbitraire selon les trois axes X, Y et Z de l'espace dans lequel il se trouve. La ligne et le cercle sont perpendiculaires l'un par rapport à l'autre pour former un objet visuel utilisant les trois axes de l'espace à trois dimensions et restant ainsi toujours visible pour l'utilisateur. Nous avons également mis à profit la redondance d'information dans ce cas en représentant la distance séparant les IHM et la main en faisant varier le rayon du cercle en même temps que la longueur de la ligne perpendiculaire au plan de panneau de dialogue.

7.2 Les trois expériences

Dans le cadre de cette thèse, nous avons réalisé trois expériences dont le but était d'évaluer l'impact sur la performance humaine de différentes conditions de manipulation et de rétroaction sur des panneaux de dialogue.

Pour l'ensemble de nos trois expériences, nous avons établi notre mesure de performance en fonction de deux variables : le temps requis pour compléter une tâche donnée et la précision spatiale de pointage. En combinant le temps et la précision spatiale, nous regroupons deux éléments interreliés intervenant dans la manipulation d'une interface. Ces deux indicateurs de performance sont liés l'un à l'autre.

Nos résultats au niveau des statistiques descriptives indiquent des différences de l'ordre de 15 à 20 % entre les temps moyens d'exécution obtenus dans différentes conditions expérimentales. Comme ces différences ne sont pas statistiquement significatives d'un point des analyses de variance, d'autres expériences seraient nécessaires pour confirmer que les gains observés sont reproductibles et donc authentiques. Comme pour Jurgens (Jurgens, Cockburn et Billinghamurst 2006), nos sujets ont eux aussi systématiquement préféré certaines combinaisons de repères et de rétroactions visuelles par rapport à d'autres d'un point de vue subjectif.

Un point semble clair suite à cette recherche, il existe effectivement un fort potentiel d'optimisation des performances humaines vis-à-vis les IHM dans les systèmes RV.

7.3 Nos hypothèses de départ et les résultats obtenus

Les deux hypothèses de départ étaient :

Hypothèse 1 : Dans les environnements virtuels 3D, le repère utilisé pour positionner les panneaux de dialogue par rapport à l'utilisateur a un impact positif sur la performance de manipulation et la satisfaction de l'utilisateur.

Hypothèse 2 : Dans le contexte de l'utilisation de panneaux de dialogue ne permettant pas de rétroaction tactile, l'utilisation de la technique « système de visée » permet d'augmenter la performance de manipulation et la satisfaction de l'utilisateur comparativement aux panneaux de dialogue n'utilisant pas cette technique.

D'un point de vue statistique, nous ne pouvons pas affirmer que nos hypothèses sont vérifiées considérant les résultats des analyses de variance effectuées. Cependant, considérant les statistiques descriptives, nous avons observé des augmentations importantes de performances humaines en fonction du repère utilisé sur les temps moyens d'essais. Nous avons également observé des augmentations de performances importantes, pouvant atteindre 20 % suivant les analyses de statistiques descriptives, lors de l'utilisation de la rétroaction visuelle du système de visée version 2 que nous avons développée dans le cadre de cette thèse. Nous disposons de trois moyens d'évaluation des performances et de la satisfaction des utilisateurs pour ce type d'expériences. En premier lieu, les analyses des statistiques descriptives (moyennes, écarts types, etc.), les analyses de variances et pour finir les données subjectives fournies par les sujets.

Les résultats d'analyses sont encourageants pour deux de ces trois moyens d'évaluations, soit les statistiques descriptives et les données subjectives. Ces

deux sources de résultats semblent indiquer que le choix du repère et l'utilisation du système de visée ont tous deux une influence sur la performance humaine ainsi que la satisfaction des utilisateurs à l'égard des interfaces.

Notre objectif est de souligner que ces résultats devraient être relativisés face à nos conclusions finales. Il est important de garder à l'esprit que la nature et le type d'expérience avec sujets humains ayant été réalisés dans le cadre de cette recherche comporte une grande part de subjectivité. Nous ne pouvons pas ignorer l'importance des préférences exprimées par les sujets car ils représentent les utilisateurs finaux de ces IHM. Le fait que les préférences des sujets concordent avec les résultats d'analyse des statistiques descriptives permet d'accorder une plus grande crédibilité à ceux-ci. Dans cette optique, nous croyons que les résultats obtenus sont concluants et démontrent effectivement que nous sommes sur une bonne voie dans l'amélioration des performances humaines lors de l'utilisation d'IHM à l'intérieur de SRV.

7.4 Recommandations sur le design des panneaux de dialogue pour SRV

Au cours de nos trois expériences, nous avons fait des observations concernant l'utilisation des IHM RV. Certaines de ces observations concordent avec des recommandations existantes dans le domaine des IHM 2D tandis que d'autres sont spécifiques au domaine des IHM 3D pour SRV compte tenu de la nature tridimensionnelle de celles-ci. Comme les systèmes de RV partagent des éléments de similitudes avec les systèmes WIMP 2D, certaines recommandations existantes pour les interfaces WIMP 2D se retrouvent dans notre liste même si celles-ci ne constituent pas une nouveauté en soi. Par ailleurs, cela n'implique pas que *toutes* les recommandations pour les IHM 2D s'appliquent systématiquement aux IHM 3D. Notre objectif était donc de déterminer quelles recommandations du domaine du 2D s'appliquent également au

domaine des IHM 3D pour SRV. De plus, étant donné les caractéristiques propres aux IHM 3D des SRV, il est également normal que certaines des recommandations qui vont suivre soient nouvelles et n'aient pas d'équivalence dans le domaine du 2D. Notre intention avec cette liste est donc d'énumérer toutes les recommandations que nous avons identifiées comme jouant un rôle important dans la performance de l'utilisateur face aux IHM 3D pour SRV, qu'elles soient issues du domaine des IHM 2D ou 3D. Cette liste inclut à la fois les recommandations issues de recherches antérieures que nous avons observées et confirmées lors de nos propres expériences ainsi que des recommandations nouvelles basées sur nos observations et résultats d'analyses. Nous présenterons en premier lieu la liste de ces recommandations pour par la suite donner des explications plus détaillées pour chacune d'elles.

- Précision de manipulation et coordination motrice
 - Utiliser une approche où les IHM principales, c.-à-d. celles qui sont fréquemment utilisées, soient situées près du corps de l'utilisateur.
 - Utiliser un repère similaire ou commun à celui de l'utilisateur (où un grand nombre de degrés de liberté sont communs).
 - Favoriser les interactions bimanuelles (utilisant les deux mains) afin de tirer profit des informations de proprioception fournies par le corps de l'utilisateur.
 - Imposer des contraintes de mouvement sur les éléments d'IHM mobiles dans l'espace (curseurs, widgets de translation / rotation) de manière à ne permettre le mouvement que sur les axes requis pour une tâche donnée.
- Design des IHM 3D
 - Utiliser la transparence sur les panneaux de dialogue pour limiter l'obstruction de la scène quand ceux-ci ne sont pas utilisés.
 - S'assurer que les éléments de l'IHM sont à l'échelle par rapport aux dimensions réelles du corps de l'utilisateur.
 - Inclure des éléments d'IHM permettant de contrôler le positionnement et le dimensionnement des panneaux de dialogue dans l'espace.

- Rétroactions

- Utiliser des changements de couleur des éléments d'interface selon les changements d'état importants du système RV :
 - Lorsque la main virtuelle entre dans une zone de proximité d'un élément d'interface (panneau de dialogue, bouton poussoir, curseur).
 - Lorsque la main virtuelle touche un élément d'interface.
 - Lorsqu'un état du système change et persiste comme dans le cas d'un bouton de type « push-pull » par exemple.
- Utiliser de forts changements de contraste et de luminosité de manière à ce que les changements d'état soient visibles et facilement perceptibles par l'utilisateur.
- Faire en sorte que la rétroaction ne soit pas affectée par des contraintes d'occlusion créées par des objets de la scène.

- Information spatiale

- L'interface doit fournir une solution visuelle au problème de détermination de la position, de la direction et de la distance du pointeur virtuel (c.-à-d., main virtuelle, curseur 3D,...) par rapport aux éléments d'interface.

- Charge cognitive

- Éviter de présenter des informations redondantes à l'utilisateur par l'entremise de rétroactions visuelles similaires actives simultanément.

7.4.1 Précision de manipulation et coordination motrice

Nos expériences sur les repères nous ont montré qu'il est préférable que les IHM soient conçues de manière à utiliser un repère proche de celui de l'utilisateur. Nos résultats montrent que les repères respectifs des IHM et de l'utilisateur doivent partager trois degrés de liberté ou plus pour maximiser les performances humaines lors de l'utilisation de ces IHM. Conséquemment, les IHM les plus fréquemment utilisées ont avantage à

être situées près du corps de l'utilisateur et d'y être attachées, à la manière d'une ceinture d'outils portée par un ouvrier. Les IHM deviennent donc une extension du corps de l'utilisateur. Cette recommandation que nous formulons rejoint parfaitement les résultats observés par Mark Mine en 1995 sur l'utilisation des deux mains et la proprioception chez l'humain.

Un autre élément que nous avons noté lors de nos expériences est la forte préférence exprimée par les sujets pour le repère utilisant les deux mains. Pourtant, les analyses statistiques ont démontré que ce repère était un des pires en termes de performance humaine. Cela montre qu'il faut tenir compte des préférences de l'utilisateur dans l'évaluation globale des IHM pour SRV. Malgré des performances inférieures, les sujets se disaient plus à l'aise en utilisant ce repère. Celui-ci permet de compenser l'absence de surface physique en permettant à l'utilisateur de se servir de sa main non dominante en guise de surface de rétroaction. Lorsque bien calibré, ce mode d'opération permet effectivement une rétroaction physique où le touché de la surface du panneau de dialogue correspond à la surface intérieure de la main. Compte tenu des commentaires positifs des sujets lors de nos expériences, nous recommandons cette approche et suggérons que d'autres recherches plus poussées à ce niveau soient faites.

Il peut être difficile d'effectuer une manipulation, à main levée, dans le vide sur un objet purement virtuel. À cet effet, il est recommandé d'incorporer des contraintes d'interactions sur des éléments d'interfaces mobiles. Un exemple d'application de contrainte consiste à limiter la translation ou la rotation d'un objet virtuel suivant un seul ou quelques axes à la fois. Une telle approche existe pour les IHM 2D de certains logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO). Un Widget affichant les axes de translation disponibles est placé sur un coin de l'objet. Si l'utilisateur attrape un des axes du Widget par son extrémité, tout mouvement sur les autres axes est bloqué tant que l'utilisateur tient l'axe du pointeur. Cela peut être transposé dans le monde des IHM 3D de manière similaire avec l'utilisation de Widgets 3D. Considérant que l'utilisateur

effectue des manipulations dans le vide, l'utilisation des contraintes est fortement conseillée afin de stabiliser les interactions. Évidemment, les mécanismes de déclenchement de ces contraintes doivent être conçus de manière à ne pas nuire aux intentions de l'utilisateur. Le mécanisme de contrainte doit permettre à l'utilisateur de contrôler le déclenchement de la contrainte. Dans l'exemple du logiciel de CAO, le Widget permet à l'utilisateur de contrôler le verrouillage des autres axes selon l'endroit où l'utilisateur saisit l'axe désiré.

7.4.2 Design des IHM 3D

L'utilisation de la transparence sur les panneaux de dialogue permet de réduire l'obstruction de la scène causée par ceux-ci. Nos panneaux de dialogue utilisaient la transparence suivant la position du pointeur virtuel (l'index de la main du sujet) par rapport au volume d'opération du menu. Lorsque la main était située hors de ce volume, le menu devenait semi-transparent, permettant de voir la scène derrière ce dernier tout en continuant à percevoir l'emplacement du menu dans l'espace. Lorsque la main du sujet entraînait dans le volume d'opération du menu, celui-ci devenait complètement opaque afin de permettre une vision optimale de l'IHM. Cette approche permet l'utilisation de plusieurs panneaux de dialogue dans la scène tout en conservant une vue adéquate de l'environnement virtuel. Cela permet une meilleure utilisation de l'espace tout en offrant un accès plus rapide aux IHM les plus fréquemment utilisés.

Certains sujets ont fait la remarque que la dimension des menus virtuels telle que perçue dans le casque de visualisation ne correspondait pas aux dimensions auxquelles ils se seraient attendus en se basant sur l'ampleur des mouvements de la main requise pour couvrir une distance équivalente dans le monde réel. Ceci met en évidence la sensibilité chez l'humain relativement aux dimensions et aux positions que les objets occupent dans l'espace à trois dimensions. Lors de la conception d'IHM pour SRV, on doit s'assurer que les échelles des IHM respectent les rapports de dimensions des objets virtuels de manière à ce que les déplacements mesurés par le système de suivi de position

concordent avec la dimension perçue dans la scène virtuelle. La disparité observée dans notre plateforme RV était due au faible champ de vision du casque de visualisation utilisé. Comme celui-ci avait un champ de vision très étroit, nous avons volontairement altéré le champ de vision affiché à l'intérieur de celui-ci pour que la scène affichée soit en réalité plus large que le champ de vision couvert par le casque de visualisation. Nous avons dû faire cela afin de limiter les occurrences de symptômes reliés au mal du simulateur (angl. : motion sickness). La correspondance exacte des échelles est recommandée dans les cas où le dispositif d'affichage utilisé permet un champ de vision large (plus de 60 degrés horizontalement). Par exemple, l'utilisation d'une voûte d'immersion permettra une correspondance exacte des dimensions des objets virtuels avec les dimensions réelles du corps de l'utilisateur. Dans le cas contraire, il peut être nécessaire d'altérer les échelles afin d'offrir un compromis entre le confort d'utilisation et l'exactitude des échelles.

Un autre commentaire des sujets était qu'ils ne pouvaient pas facilement changer la position des panneaux de dialogue lors de leurs essais. Dans le contexte de nos expériences, cela était une limitation imposée. Ceci étant dit, le fait que les sujets se plaignent de cette contrainte indique que cette fonctionnalité doit être présente lors de la conception d'une IHM pour SRV utilisée à l'intérieur d'une application concrète.

7.4.3 Rétroactions

Il est important que l'utilisateur puisse suivre les changements d'état au cours des manipulations qu'il effectue à l'intérieur de l'environnement virtuel. Pour ce faire, il faut que les éléments d'interfaces offrent une communication bidirectionnelle avec l'utilisateur. Les boutons et curseurs doivent non seulement permettre à l'utilisateur d'entrer des informations dans le système, ils doivent aussi permettre à l'utilisateur de voir le résultat de ses interactions. Est-ce que l'utilisateur a bel et bien appuyé sur le bouton par exemple? Le bouton lui-même indiquera par un changement de couleur ce qu'il « ressent » lorsqu'il est touché par l'utilisateur. En d'autres termes, il faut voir

chaque élément de l'interface homme-machine comme indépendant et autonome. Dans cette perspective, l'utilisateur est lui-même un des éléments de l'interface. Il en va de même pour tous les éléments d'interface virtuelle telle que les boutons, curseurs et autres éléments visuels rendus et affichés par l'ordinateur.

Plusieurs facteurs font qu'il est recommandé d'utiliser de forts contrastes concernant les changements de couleur et autres retours de rétroaction afin que ces changements d'état soient facilement perceptibles par l'utilisateur. D'une part, comme le système peut exiger un fort degré de concentration et d'attention de la part de l'utilisateur, le retour d'information vers celui-ci doit suffisamment attirer son attention pour qu'il ait connaissance de cette rétroaction. Un autre facteur d'ordre technique est relié au dispositif d'affichage lui-même. Souvent, le dispositif d'affichage utilisé en RV ne sera pas en mesure d'afficher de fortes variations de contrastes (les affichages utilisant des cristaux liquides LCD sont particulièrement affectés par de faibles niveaux de contrastes). À titre d'exemple, le casque de visualisation que nous avons utilisé offre un ratio de contraste¹ de 100 : 1 alors que les projecteurs multimédias modernes offrent des ratios de contraste de 5000 : 1 et plus. Nous recommandons un dispositif d'affichage ayant un ratio de contraste supérieur à 400 : 1 afin de permettre à l'utilisateur de facilement distinguer des variations plus subtiles de contrastes de la scène virtuelle. Le faible contraste de notre casque a sûrement eu un rôle à jouer dans le fait que plusieurs sujets ont affirmé ne pas bien percevoir l'ombre de manière générale. Dans d'autres cas, c'est la luminosité qui sera limitée (de moins en moins un problème avec les nouveaux projecteurs plus performants). Les voûtes d'immersions utilisant des projecteurs à tubes cathodiques (CRT) étaient particulièrement affectées par ces limitations en luminosité. Pour compenser pour ces lacunes d'ordre technique, on optera pour l'utilisation de contrastes prononcés lors du design et de la modélisation des scènes virtuelles afin de

¹ Le ratio de contraste exprime la différence de luminance entre une zone de l'image ayant la plus forte intensité de blanc et celle ayant le noir le plus pur.

bien faire ressortir les changements visuels d'un élément d'interface de manière à attirer l'attention de l'utilisateur. On peut également parler de contraste en terme de changement de couleur dans la présente discussion. On recommande d'utiliser des changements de couleur, c.-à-d. où la longueur d'onde optique change suivant des sauts en fréquences suffisants pour que le changement soit aisément perçu par l'utilisateur. Dans le cadre de nos expériences, nous avons utilisé le passage du gris vers le jaune et le vert. Le gris était la couleur d'origine de l'élément d'interface, dénotant l'état neutre ou de repos. Le gris contient plusieurs longueurs d'onde et une intensité optique moyenne. Il n'attire pas particulièrement l'attention de l'utilisateur. Par contre, le jaune et le vert ont une intensité élevée et une longueur d'onde plus précise, située aux alentours de 577 nanomètres pour le jaune alors que le vert se situe aux alentours de 542 nanomètres. De plus, la physiologie de l'œil chez l'humain fait en sorte que ces longueurs d'onde sont plus fortement perçues que les régions limites qui sont le bleu et le violet d'une part, et le rouge vers l'infrarouge de l'autre part. Le spectre visible couvre une plage de longueur d'onde allant de 400 (ultraviolet - violet) à 800 nanomètres (rouge - infrarouge). Il est donc recommandé de choisir des sauts de couleurs de telle sorte que l'utilisateur perçoive des couleurs distinctes plutôt qu'une variation d'une même couleur (de jaune orange vers jaune verdâtre par exemple). Il y a donc dans les faits très peu de choix de couleurs pouvant être utilisées pour représenter des changements importants d'états. Il y a le bleu, le vert, le jaune et le rouge, ce qui ne donne que quatre états. On cherchera donc à utiliser ces couleurs de base de façon judicieuse et mesurée. De plus, les connaissances en IHM 2D nous suggèrent d'utiliser les couleurs selon des notions connues et bien établies chez l'utilisateur. Par exemple, le rouge sera réservé à des situations critiques, extrêmes ou dangereuses, requérant une attention immédiate, alors que le jaune indiquera un état nécessitant l'attention et dénotant une mise en garde. Le vert quant à lui indiquera des états satisfaisants d'un système et indiquera que « les choses vont bien » ou sont correctes. Le bleu n'a pas de signification type lui étant attribuée. On qualifie souvent le bleu de couleur « froide » versus le rouge étant une

couleur « chaude ». Il est par ailleurs possible de faire varier l'intensité d'une couleur donnée plutôt que de changer de couleur proprement dite. Cela permettra d'étendre le nombre d'états représentables simultanément. On devra dans ce cas faire attention à limiter le nombre d'intensités utilisées à deux ou trois au plus afin d'offrir un fort contraste entre chaque variation d'intensité. Un exemple de changement d'intensité est un bouton, de couleur quelconque, qui sera plus foncé lorsque le curseur virtuel ne le touche pas et qui deviendra plus clair lorsque touché par ce dernier. Dans tous les cas, le changement de couleur ou d'intensité devra faire en sorte qu'il est perceptible à l'œil sans que l'utilisateur n'ait à concentrer son attention directement sur cet élément d'interface.

Le succès obtenu avec le système de visée démontre de l'importance de faire en sorte que la rétroaction ne soit pas affectée par des contraintes d'occlusion créées par des objets de la scène. Lors de nos tests effectués avec la version 1 du système de visée, nous n'avons pas mesuré d'améliorations notables des performances des sujets. La version 1 du système de visée n'utilisait pas le cercle à la base de celui-ci. L'utilisation de la ligne seule ne permettait pas au sujet de voir la rétroaction lorsque le doigt cachait celui-ci. La rétroaction devenait de même invisible lorsque le doigt était trop près du menu ou d'un élément d'interface. L'ajout du cercle à rayon dynamiquement variable a apporté une solution à ce problème d'occlusion en permettait au sujet de maintenir un contact visuel avec la rétroaction, même dans les conditions d'occlusions mentionnées ci-haut.

7.4.4 Les informations spatiales

Nos recherches ont démontré l'importance de fournir une information concernant la position, la direction et la distance séparant le pointeur (la main ou le doigt de l'utilisateur en général) et les éléments d'interface. Cette information est souvent difficile à obtenir par le simple regard de l'utilisateur à travers des dispositifs d'affichages RV comme le casque de visualisation ou une voûte d'immersion. Dans

certains cas, la scène n'est pas affichée en utilisant la stéréoscopie, ce qui rend la perception des profondeurs encore plus difficile. En utilisant une rétroaction visuelle du type du système de visée, l'utilisateur dispose de ces informations, peu importe le dispositif d'affichage étant utilisé et le mode d'affichage (stéréoscopie vs monoscopie).

Par solution visuelle, on entend que l'utilisateur doit pouvoir voir un objet dans la scène qui lui communique de l'information sur sa position dans l'espace vis-à-vis des autres objets de la scène. Nous allons plus loin en indiquant que la rétroaction visuelle doit représenter de manière visuelle la solution à un problème qui requerrait une charge cognitive importante en son absence. Dans cette thèse, nous avons introduit le système de visée qui utilise une telle approche. Le système de visée est explicite car il affiche graphiquement, en trois dimensions, un vecteur et un cercle qui permettent à l'utilisateur de visualiser instantanément la distance entre l'index et l'élément d'interface le plus proche. Le système de visée est la seule rétroaction qui donne explicitement et clairement une information complète suivant les trois axes dans l'espace.

Derrière le système de visée se cache un algorithme mathématique qui, à chaque itération du système RV, calcule la distance séparant le pointeur virtuel (le doigt de la main virtuelle) de la surface du panneau de dialogue le plus près. La portion visible du système de visée est en fait la solution de ce calcul. Elle prend la forme d'un cercle dont le rayon varie en fonction de la distance (du résultat de l'algorithme) et d'une ligne perpendiculaire à la surface du panneau de dialogue et connectant le pointeur à celle-ci. Avec ces objets visuels, l'utilisateur obtient instantanément la solution du problème de localisation du pointeur (position, direction et distance) en relation avec la cible, la surface du panneau de dialogue et les éléments d'interfaces qui le composent. Il peut explicitement « voir » la distance qui sépare le doigt de la surface du panneau de dialogue. C'est ici qu'il y a un réel gain à faire en matière d'amélioration des performances, en diminuant la charge cognitive de l'utilisateur en lui enlevant la tâche de lui-même mentalement résoudre ce genre de problème. En l'absence d'aides comme

le système de visée, le cerveau doit déduire le résultat de ce problème de distance en se basant sur d'autres indices visuels de la scène, ce qui n'est pas forcément trivial et requiert un niveau de concentration accru.

7.4.5 La charge cognitive de l'utilisateur

Cela nous amène donc au dernier point qui est de minimiser la charge cognitive par l'utilisation adéquate de rétroactions visuelles. Celles-ci doivent offrir des informations visuelles qui réduisent la quantité de travail que le cerveau de l'utilisateur doit prendre en charge. Ces rétroactions visuelles devraient de plus minimiser l'information présentée au strict minimum et éviter de présenter des informations redondantes, sauf si cela ajoute à la qualité ou à la fiabilité de cette information. Le système de visée est un exemple de redondance justifiée car les deux composantes visuelles montrant la même information (la position, la direction et la distance) sont disposées de manière à ce qu'une reste visible lorsque l'autre est caché par d'autres objets comme la main virtuelle par exemple. La redondance est nécessaire dans ce cas pour répondre à des contraintes imposées par le fait que nous nous trouvons dans un environnement à trois dimensions. Dans ce cas précis, la redondance permet d'augmenter la fiabilité de la transmission de l'information véhiculée par le système de visée, la distance entre deux objets dans l'espace 3D, indépendamment de l'angle de regard.

7.5 Limitations d'applicabilité de nos résultats

Les résultats de cette recherche visent principalement les systèmes RV n'utilisant pas de dispositifs de pointage physiques spécialisés comme la tablette et le stylo (Angus et Sowizral 1995). Notre approche fut de fournir des mesures d'améliorations dans les cas précis et spécifiques où les éléments d'interfaces n'offraient pas de rétroaction tactile, n'ayant pas de contreparties physiques dans l'environnement de l'utilisateur. Dans ces cas, il fallait permettre à l'utilisateur d'interagir avec des interfaces virtuelles, et ce, avec

des méthodes permettant d'être efficace et de manipuler le plus rapidement possible les interfaces flottant dans le vide. Nous avons choisi ce cas car il représente encore en 2008 la situation réelle d'utilisation d'une majorité de SRV. En effet, la plupart des voutes d'immersions en usage en 2008 utilisent un dispositif de pointage comme le Wand ou un dérivé de celui-ci.

Cela dit, nos résultats de recherche et conclusions peuvent s'appliquer à des situations où une interface physique est présente. On peut effectivement considérer les impacts de l'utilisation d'une rétroaction visuelle comme le système de visée dans un contexte où un dispositif de type tablette et stylo est utilisé. Dans ce cas, si le SRV utilise un casque de visualisation translucide ne permettant pas de voir la scène extérieure (ce qu'on nomme des *see-through HMDs* dans la littérature anglaise), l'utilisateur ne peut voir la tablette ou le stylo qu'il tient dans ses mains. Dans un tel cas, une rétroaction visuelle comme celle du système de visée peut s'avérer très utile, même en présence d'une surface réelle d'interaction. Le système de visée permettra dans ce cas de voir où se trouve le pointeur (le bout du crayon) par rapport à la surface de la tablette, et ce, sans que l'utilisateur puisse physiquement voir ces objets réels. L'avantage d'une approche mixte comme celle-ci est que l'on combine les avantages et les forces des dispositifs d'interfaces physiques et les rétroactions visuelles virtuelles. On obtient un retour de force physique réel produit par le contact du crayon et de la surface de la tablette tout en permettant l'utilisation de ce dispositif avec un casque de visualisation fermé (ne permettant pas de voir l'environnement extérieur).

Nos résultats peuvent également être utilisés sur des SRV utilisant un environnement CAVE ou autres dispositifs à base de projection sur une surface-écran plutôt qu'un casque immersif. À la rigueur, nos IHM peuvent être utilisées sur un SRV de bureau utilisant un écran d'ordinateur standard n'offrant pas la vision stéréoscopique. Dans ce cas, le système de visée peut s'avérer très efficace pour offrir à l'utilisateur un guidage pour atteindre une cible avec le pointeur virtuel en l'absence d'autres informations

comme la stéréoscopie.

Nos IHM sont donc indépendantes à la fois du dispositif d’affichage et du dispositif de pointage utilisé. Cela n’implique par contre pas que les résultats et conclusions contenus dans cette recherche puissent être directement transposés d’un cas d’utilisation à un autre. Il est probable que les mesures absolues de temps d’essais et de précision de manipulation obtenus lors de nos trois expériences auraient été différentes si nous avions utilisé un autre dispositif de pointage ou un autre dispositif d’affichage. Cela dit, il est possible que les tendances relatives observées entre les facteurs mesurés aient été similaires. Il est donc évident que d’autres tests devraient être effectués avec ces autres dispositifs pour confirmer nos résultats et nos conclusions afin de pouvoir conclure sur une base plus large. Nous avons pris soin de rendre le système de visée indépendant des dispositifs pour que des recherches futures puissent être poursuivies. Le but ultime à cet égard est de développer des IHM pour SRV permettant des gains de performances équivalents indépendamment des composantes matérielles utilisées.

7.6 Avenues de recherche futures

Cette recherche a permis de faire ressortir plusieurs indicateurs de performance. Nous proposerons ici quelques pistes de recherches futures dans la direction que nous avons prise avec cette recherche.

7.6.1 Considérations relatives aux limitations technologiques

Suite aux observations faites lors de nos sessions d’expériences, nous avons constaté qu’un des principaux problèmes à la manipulation d’IHM de petite taille reste relié aux dispositifs de suivi de positions couramment utilisés de nos jours. La technologie de suivi de position magnétique n’est pas adaptée aux environnements de laboratoire. Ces environnements comportent trop de sources d’interférences radio magnétiques, ce qui

rend l'utilisation des systèmes de suivi mentionnés ci-haut difficile, voire inopérables dans certains cas. Nous recommandons donc l'utilisation de systèmes de suivi de position optique, utilisant des techniques de vision numérique par l'entremise de caméras et marqueurs (cibles réfléchissant la lumière). Ce type de système offre une précision nettement supérieure ainsi qu'une stabilité temporelle accrue des données recueillies.

7.6.2 Pousser davantage dans la direction du système de visée (solutions visuelles)

La rétroaction visuelle du système de visée que nous avons introduite dans cette recherche s'est avérée l'une des voies les plus prometteuses en ce qui concerne l'augmentation de performances. Un des facteurs ayant contribué à ce succès est que cette rétroaction fournit visuellement une solution à un problème qui demande un effort cognitif important. L'autre facteur gagnant de cette approche fut d'introduire la notion d'immunité à l'occlusion d'une rétroaction visuelle 3D. Cela a permis d'obtenir des gains de performances substantiels.

Nous estimons donc que des recherches futures dans cette voie devraient reprendre ce concept et tenter de pousser plus loin ces deux notions.

7.6.3 Pousser vers des études hybrides

Notre recherche s'est concentrée uniquement sur des interfaces virtuelles, dans un contexte où il n'y a pas de contrepartie réelle (physique) à ces interfaces. Il serait intéressant de faire des recherches qui combinent ces deux volets afin de voir quelles sont les combinaisons d'interfaces virtuelles et réelles qui permettent d'obtenir les meilleures performances pour contrôler une simulation dans un environnement virtuel ou de réalité augmentée. Par exemple, il serait intéressant de refaire les expériences en utilisant un dispositif de type « tablette et stylo » en combinaison avec une rétroaction comme le système de visée afin d'identifier les opportunités d'optimisation de

performances.

7.6.4 Comparatif entre cas non-RV et cas RV

Un autre aspect que nous n'avons pas considéré est de faire un comparatif entre le cas virtuel et le cas réel pour des tâches de la vie courante. Par exemple, quelle est la différence de performance sur la tâche de calculer avec une calculatrice réelle vis-à-vis celle que nous avons présentée lors de la troisième expérience? Une telle étude nous permettrait de répondre à la question : « de combien sommes-nous proches des performances réelles d'une situation de tous les jours lorsque nous utilisons des systèmes de réalité virtuelle? ».

À l'heure actuelle, nous en sommes encore à l'étape initiale où nous cherchons à implanter des IHM dans les SRV. L'étape suivante, que nous avons entamée dans cette recherche, est d'ajuster et d'optimiser ces IHM pour SRV de manière à ce que les SRV eux-mêmes se rapprochent davantage de notre environnement réel dans lequel nous vivons et où nous effectuons diverses tâches. Le but ultime visé ici est de recréer de manière quasi parfaite notre environnement réel en nous permettant de conduire nos tâches de tous les jours à l'intérieur d'un environnement virtuel, tout en nous permettant d'aller au-delà des limites de ce monde réel en exploitant le plein potentiel de la RV.

7.7 Leçons apprises sur la conduite d'expériences de RV avec sujets humains

7.7.1 Le nombre de sujets humains requis et la force statistique

À la base, les problèmes que nous avons rencontrés lors des analyses de variance sont dus à une trop grande variabilité des mesures. La difficulté est d'identifier la ou les causes de ces trop larges variations des mesures. Nous avons déjà identifié des erreurs de mesures provenant du système de suivi comme cause possible. Cependant, il est

également possible que la cause de variabilité soit en fait l'humain et que les résultats d'analyses aient été similaires avec un système de suivi plus performant. Il semble donc qu'une approche d'essais et erreurs soit nécessaire afin de déterminer qu'elles doivent être les conditions initiales requises pour mener des expériences de performances humaines avec ces systèmes de RV.

Une recommandation pouvant donc être émise consisterait à effectuer une expérience de validation avant d'entreprendre les expériences elles-mêmes. Cette expérience de validation aura pour but de tester la force statistique des mesures prises par l'équipement RV afin d'établir si les données sont suffisamment reproductibles, c.-à-d., ayant une variabilité restant dans des limites permettant d'obtenir des variances significatives suivant le seuil des 5 %. Elle permettrait également de voir si le nombre de sujets est suffisant.

Idéalement, des tests devraient être conduits sans le concours de sujets humain, en utilisant des dispositifs mécaniques asservis permettant de déplacer les senseurs de suivi de manière précise. Cela permettrait de valider que le système de suivi ait une précision suffisante pour détecter des déplacements statistiquement significatifs. Le test peut être simplement de mesurer le déplacement linéaire d'un senseur sur une distance de quelques centimètres et de répéter la manœuvre suivant un nombre de répétitions égal à celui qui sera utilisé lors des vraies expériences. Par la suite, on referait le même test avec des sujets humains afin de voir les différences de variabilité sur les mesures. Dans le cas où les analyses de variance ne seraient concluantes que dans le cas sans sujets, on essaierait d'augmenter le nombre de sujets jusqu'à l'apparition d'une force statistique suffisante. Si l'augmentation du nombre de sujets n'apporte pas d'améliorations significatives de la force statistique, il faudra reconsidérer les facteurs mesurés ainsi que la tâche utilisée pour effectuer les mesures. Une tâche différente devra potentiellement être considérée.

7.7.2 Homogénéité des sujets

La difficulté avec les expériences portant sur la performance humaine est qu'elles sont influencées par une quantité importante de facteurs, rattachés de près ou de loin aux sujets eux-mêmes, ayant divers degrés d'influence sur le résultat final. L'autre difficulté est qu'il est difficile d'identifier ces facteurs, dont plusieurs relèvent du domaine du subjectif ou sont difficilement quantifiables. On pense entre autres aux facteurs relatifs à la psychologie humaine comme les humeurs ou les sentiments. La liste qui suit présente une liste non exhaustive de facteurs qui ont pu avoir eu un effet sur nos résultats :

- Facteurs contrôlables / mesurables
 - Relatif au sujet
 - L'âge
 - Le genre
 - La taille
 - La dextérité manuelle
 - Niveau d'expérience antérieur à l'utilisation de SRV
 - Le caractère ou profil psychologique (impatience, agressivité, nature craintive, timidité...)
 - Facteurs externes
 - La température ambiante de la pièce (inconfort physique)
 - Le niveau de luminosité présente dans la pièce (difficulté de vision)
 - Le niveau de bruit ambiant (distractions)
- Facteurs difficilement contrôlables / mesurables de manière précise
 - Le niveau de fatigue initial du sujet
 - Le niveau de concentration du sujet
 - Le niveau d'intérêt du sujet

Certains de ces facteurs difficilement contrôlables font en sorte qu'il persistera toujours un degré d'incertitude non négligeable se traduisant par une diminution de la force statistique des analyses de variances pour des expériences faisant appel à des sujets humains.

Une première méthode pour diminuer les impacts de ces facteurs inconnus et augmenter la force statistique des analyses est l'augmentation du nombre de sujets humains. Une

seconde méthode consiste à diminuer les variabilités externes à l'intérêt propre de la recherche visée. On cherchera donc à avoir un bassin de sujets humain le plus homogène possible pour ce qui est de l'âge, du genre, de la taille, etc. Il serait par exemple possible d'augmenter la force statistique des résultats en n'utilisant que des hommes ou des femmes. En contrepartie, ceci a l'inconvénient de restreindre les conclusions tirées à un champ d'applicabilité plus étroit.

7.7.3 La durée et la complexité de la tâche

Lors des deux premières expériences, nous avons utilisé une tâche durant en moyenne 5.5 secondes. Lors de la troisième expérience, la durée moyenne d'exécution de la tâche est passée à 18.5 secondes, soit près de 3.4 fois plus longue en durée. Les résultats d'analyses statistiques de variance n'ont pas révélé d'amélioration au niveau de la force statistique malgré l'augmentation de la durée de la tâche. Il n'est donc pas clair qu'un temps d'exécution de tâche plus long entraîne nécessairement une plus grande facilité à dégager des tendances statistiquement significatives.

La nature de la tâche elle-même a probablement un impact sur les données mesurées. Les questions que l'on peut se poser sont :

- Est-ce que la tâche permet de cibler précisément le ou les facteurs que nous cherchons à évaluer?
- Quelle portion, en termes de durée de temps passé à manipuler, sert à évaluer le ou les facteurs d'intérêts?
- La tâche demandée peut elle-même induire un biais dans les mesures effectuées?

Pour les trois expériences, nous avons utilisé une zone invisible autour des panneaux de dialogues pour déclencher le chronométrage d'un essai. Ceci permettait de limiter notre mesure de temps à la portion de manipulation strictement intéressante, soit, lorsque la main est presque en contact avec la surface des panneaux de dialogue. Nous évitions ainsi le risque d'inclure des temps parasites n'ayant pas de réelle connexion avec l'effet

que nous désirions mesurer.

Pour ce qui est du biais pouvant avoir été induit par les tâches elles-mêmes, cela reste difficile à déterminer. Au niveau des repères, il y avait peut-être un biais au niveau de repère 4 utilisant les deux mains. Ce repère était effectivement différent des 4 autres. Il était le seul où l'utilisateur pouvait contrôler la position du panneau de dialogue dans l'espace. Il était également le seul à requérir les deux mains de l'utilisateur. Il n'était donc pas totalement sur un pied d'égalité avec les autres cas.

7.7.4 Particularités liées aux environnements de RV

Les principaux facteurs d'ordres techniques pouvant affecter les performances du SRV sont la précision et la latence des équipements utilisés. La précision de l'équipement limite la précision de pointage maximale que les sujets peuvent atteindre. La présence de latence implique généralement des perturbations des manipulations des sujets qui peuvent prendre la forme d'hésitations des mouvements par exemple.

Une recommandation pouvant être faite pour ce genre d'expérience dans le futur serait de s'assurer que le système de suivi permet de mesurer les mouvements avec des précisions de l'ordre du millimètre. On s'assurera également que la stabilité temporelle des données retournée est suffisante. On peut se baser sur la dimension des éléments d'IHM afin de déterminer les précisions requises. Une règle pouvant être proposée serait d'avoir une précision supérieure à 10 fois la dimension d'un élément d'IHM (un bouton par exemple). Donc on parle d'une précision de suivi de 2 mm pour des boutons de 2 cm. Cela vaut autant pour la précision statique que la stabilité temporelle des données retournées par le système de suivi.

La latence est un autre point important à considérer. La latence globale du SRV devrait être inférieure à 100 msec en tout temps afin d'éviter l'apparition de maux attribuable au mal du simulateur (angl. : motion sickness). Une latence supérieure à 100 msec

entraînera également des délais suffisants pour nuire aux manipulations des IHM, entachant ainsi les analyses de performance humaines. On peut faire un constat équivalent au niveau du sens de la vision chez l'humain. On pourra démontrer par des tests qu'une séquence vidéo animée dont le taux d'images par seconde descend sous les 10 à 15 images secondes (donc entre 67 et 100 msec par image) fera en sorte que le cerveau cessera d'interpréter cette séquence comme une animation fluide et continue pour en venir à voir cette scène comme une succession d'images statiques et distinctes. Ce « décrochage » est dû à la même latence que celle qui affecte les autres sens et entraîne des délais de réactions chez l'utilisateur du SRV.

7.8 Le mot de la fin

Ce qui nous semble évident suite à cette recherche, c'est qu'il persiste un large éventail de possibilités de recherche. Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse font ressortir qu'il existe un fort potentiel d'augmentation des performances pour ce type d'interfaces.

Les travaux que nous avons réalisés dans cette thèse raffermissent notre conviction initiale qu'une des solutions au problème de la lenteur de l'acceptation des technologies de RV à une échelle beaucoup plus large se trouve localisée dans le développement et l'utilisation d'IHM plus sophistiquées et simples à utiliser. Ces IHM ont le potentiel de permettre des niveaux d'interactivité encore non exploités par les systèmes de RV actuels. L'intégration d'IHM évoluées dans les systèmes de RV permettra d'utiliser la RV pour effectuer des tâches complexes dans divers domaines d'activités comme le design industriel, l'architecture des bâtiments et le génie mécanique en permettant de littéralement construire ceux-ci, pièce par pièce, sans quitter l'environnement virtuel. Les IHM RV basées sur des métaphores visuelles comme les panneaux de dialogue ont la capacité d'ouvrir de nouvelles voies en apportant aux systèmes de RV ce que la

révolution WIMP a apporté aux environnements de travail sur PC. Nous espérons que nos travaux de recherche vont inspirer d'autres chercheurs à pousser les recherches dans cette direction.

RÉFÉRENCES

AARON MARCUS (1997). "Graphical User Interfaces, Chapter 19". *Handbook of Human-Computer Interaction*. Sous la direction de L.T.K.P.P. HELANDER M.Elsevier Science B.V.

ANGUS, I.G., SOWIZRAL, H.A. (1995). "Embedding the 2D interaction metaphor in a real 3D virtual environment". *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems II*, Feb 7-8 95. San Jose, CA, USA : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bellingham, WA, USA. 2409, P. 282-293.

AUSKSTAKALNIS, S., BLATNER, D. (1992). *Silicon mirage - The art and science of virtual reality*. California : PEACHPIT PRESS, INC. 317 p.

BERNATCHEZ, M. (1996). *Conception d'un système de visualisation à base de réalité virtuelle*. 134 p. Master degree dissertation, Laval University.

BERNATCHEZ, M., ROBERT, J.-M. (2007). "A Study on the Impact of Spatial Frames of Reference on Human Performance in Virtual Reality User Interfaces". *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Systems, Men and Cybernetics (SMC 2007)*. Montréal, Québec, Canada.

BILLINGHURST, M., GRASSET, R., LOOSER, J. (2005). "Designing augmented reality interfaces". *Computer Graphics*. 39:1. 17-22.

BOWMAN, D.A. (1999). *Interaction Techniques For Common Tasks In Immersive Virtual Environments: Design, Evaluation, and Application*. 142 p. Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology.

BOWMAN, D.A., HODGES, L.F. (1995). *User Interface Constraints for Immersive Virtual Environment Applications*. Visualization and Usability Center: 142 p. Technical Report GIT-GVU-95-26.

BOWMAN, D.A., HODGES, L.F. (1997). "An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments". *Proceedings of 1997 Symposium on Interactive 3 D Graphics, 27-30 April 1997*. Providence, RI, USA : ACM. P. 35-8.

BOWMAN, D.A., HODGES, L.F., BOLTER, J. (1998). "The virtual venue: user-computer interaction in information-rich virtual environments". *Presence* . 7:5. 478-93.

BOWMAN, D.A., KRUIJFF, E., LAVIOLA, J.J.Jr., POUPYREV, I. (2001). "An introduction to 3-D user interface design". *Presence*. 10:1. 96-108.

BOWMAN, D.A., WINGRAVE, C.A. (2001). "Design and evaluation of menu systems for immersive virtual environments". *IEEE Virtual Reality 2001, Mar 13-17 2001*. Yokohama : Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society. P. 149-156.

BOWMAN, D.A., WINGRAVE, C.A., CAMPBELL, J.M., LY, V.Q., RHOTON, C.J. (2002). "Novel uses of Pinch Gloves TM for virtual environment interaction techniques". *Virtual Reality*. 6:3. 122-9.

CONINX, K., VAN REETH, F., FLERACKERS, E. (1997). "2D human-computer interaction techniques in immersive virtual environments". *Computer Networks and ISDN Systems: Proceedings of the 1996 5th International Conference on Computational Graphics and Visualization Techniques, COMPUGRAPHICS, Dec 16-18 1996*. 29:14. 1685-1693.

CONNER, B.D., SNIBBE, S.S., HERNDON, K.P., ROBBINS, D.C., ZELEZNIK, R.C., VAN DAM, A. (1992). "Three-dimensional widgets". *Proceedings of the 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics, Mar 29-Apr 1 1992*. Cambridge, MA, USA : Publ by ACM, New York, NY, USA. P. 183.

COQUILLART, S., WESCHE, G. (1999). "Virtual palette and the Virtual Remote Control Panel: a device and an interaction paradigm for the responsive workbench". *Proceedings - Virtual Reality Annual International Symposium: Proceedings of the 1999 IEEE Virtual Reality, IEEE VR'99, Mar 13-Mar 17 1999*. 213-216.

DACHSELT, R., HÜBNER, A. (2006). "A Survey and Taxonomy of 3D Menu Techniques". *Proceedings of the 12th Eurographics Symposium on Virtual Environments (EGVE'06)*.

DARKEN, R. (1994). "Hands-off interaction with menus in virtual spaces". *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems, Feb 8-10 1994*. San Jose, CA, USA : Publ by Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bellingham, WA, USA. 2177, P. 365-371.

DARKEN, R., TONNESEN, C., PASSARELLA-JONES, K. (1995). "Bridge between developers and virtual environments: a robust virtual environment system architecture". *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems II, Feb 7-8 95*. San Jose, CA, USA : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bellingham, WA, USA. 2409, P. 234-240.

ELLIS, S.R., BEGAULT, D.R., WENZELL, E.M. (1997). *Virtual environments as human-computer interfaces*. North-Holland : In Helander, M., Landauer, T. K., Prabhu, P. V. (Eds). *Handbook of human-computer interactive*, 2nd Edition, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V. 163-201 p.

FORSBERG, A., HERNDON, K., ZELEZNIK, R. (1996). "Aperture based selection for immersive virtual environments". *Proceedings of the 1996 9th ACM Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, Nov 6-8 1996. Seattle, WA, USA : ACM, New York, NY, USA. P. 95-96.

GUIARD, Y. (1988). "The Kinematic Chain as a Model for Human Asymmetrical Bimanual Cooperation". *Cognition and Action in Skilled Behaviour*. North-Holland : Colley, A., Beech, J., Editors, Elsevier Science Publishers B.V. P. 205-228.

HINCKLEY, K., PAUSCH, R., PROFFITT, D., PATTEN, J., KASSELL, N. (1997). "Cooperative bimanual action". *Proceedings of the 1997 Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI*, Mar 22-27 1997. Atlanta, GA, USA : ACM, New York, NY, USA. P. 27-34.

HODGE, L.F., ANDERSON, P., BURDEA, G.C., HOFFMAN, H.G., ROTHBAUM, B.O. (2001). "Treating psychological and physical disorders with VR". *IEEE Computer Graphics and Applications*. 21:6. 25-33.

HUIZINK, C., COLLOT, J., LEMOINE, P. (2003). *Amélioration d'un Concept d'Interaction dans un Environnement Virtuel*. Powerpoint presentation,

JACOBY, R., ELLIS, S. (1992). "Using Virtual Menus in a Virtual Environment". *Proceedings of SPIE: Visual Data Interpretation*. 39-48.

JACOBY, R.H., FERNEAU, M., HUMPHRIES, J. (1994). "Gestural interaction in a virtual environment". *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems*, Feb 8-10 1994. San Jose, CA, USA : Publ by Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bellingham, WA, USA. 2177, P. 355-364.

JOHN M EVANS LLC. (2006). *Standards for Visual Acuity*. National Institute for Standards and Technology - Intelligent Systems Division: 18 p.

JURGENS, V., COCKBURN, A., BILLINGHURST, M. (2006). "Depth cues for augmented reality stakeout". *CHINZ 2006: 7th International Conference NZ Chapter of the ACM's Special Interest Group on Human-Computer Interaction(SIGCHI-NZ), Jul 6-7 2006*. Christchurch, New Zealand : Association for Computing Machinery, New York, NY 10036-5701, United States. 158, P. 117-124.

KIM, G.J., HAN, S.H., HUICHUL YANG, CHANGSEOK CHO (2004). "Body-based interfaces". *Applied Ergonomics*. 35:3. 263-74.

KIM, N., KIM, G.J., PARK, C.-M., LEE, I., LIM, S.H. (2000). "Multimodal menu presentation and selection in immersive virtual environments". *Proceedings - Virtual Reality Annual International Symposium: IEEE Virtual Reality 2000, Mar 18-Mar 22 2000*. 281.

KOHLI, L., WHITTON, M. (2005). "The haptic hand: Providing user interface feedback with the non-dominant hand in virtual environments". *Proceedings - Graphics Interface 2005, May 9-11 2005*. Victoria, BC, Canada : Canadian Information Processing Society, Mississauga, ON L4W 5A6, Canada. P. 1-8.

KURTENBACH, G., FITZMAURICE, G., BAUDEL, T., BUXTON, B. (1997). "Design of a GUI paradigm based on tablets, two-hands, and transparency". *Proceedings of the 1997 Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI, Mar 22-27 1997*. Atlanta, GA, USA : ACM, New York, NY, USA. P. 35-42.

LARIMER, D., BOWMAN, D. (2003). "VEWL: A Framework for Building a Windowing Interface in a Virtual Environment.". *Proceedings of INTERACT: IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction*. P. 809-812.

LEMOINE, P., VEXO, F., THALMANN, D. (2003). "Interaction Techniques: 3D Menus-based Paradigm". *AVIR 2003* .

LINDEMAN, R.W., SIBERT, J.L., TEMPLEMAN, J.N. (2001). "The effect of 3D widget representation and simulated surface constraints on interaction in virtual environments". *IEEE Virtual Reality 2001, Mar 13-17 2001*. Yokohama : Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society. P. 141-148.

MINE, M. (1995). *Virtual environment interaction techniques*. UNC Chapel Hill Computer Science. Technical Report TR95-018.

MINE, M. (1996). *Working in a Virtual World: Interaction Techniques Used in the Chapel Hill Immersive Modeling Program*. UNC Chapel Hill Computer Science. Technical Report TR96-029.

MINE, M.R. (1997). *Exploiting Proprioception in Virtual-Environment Interaction*. 165 p. Doctoral dissertation, University of North Carolina at Chapel Hill.

MINE, M.R., BROOKS, F.P.Jr., SEQUIN, C.H. (1997). "Moving objects in space: Exploiting proprioception in virtual-environment interaction". *Proceedings of the 1997 Conference on Computer Graphics, SIGGRAPH, Aug 3-8 1997*. Los Angeles, CA, USA : ACM, New York, NY, USA. P. 19-26.

MULDER, J.D. (2005). "Menu selection in desktop virtual reality". *Central European Multimedia and Virtual Reality Conference 2005, 8-10 June 2005*. Prague, Czech Republic : Eurographics Assoc. P. 121-7.

PIERCE, J.S. (2000). *Expanding the Interaction Lexicon For 3D Graphics*. 26 p. Thesis Proposal, School of Computer Science, Carnegie Mellon University.

PIERCE, J.S., FORSBERG, A., CONWAY, M.J., HONG, S., ZELEZNIK, R., MINE, M.R. (1997). "Image plane interaction techniques in 3D immersive environments". *Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics, Apr 27-30 1997*. Providence, RI, USA : ACM, New York, NY, USA. P. 39-43.

POUPYREV, I., WEGHORST, S., BILLINGHURST, M., ICHIKAWA, T. (1998). "A Study of Techniques for Selecting and Positioning Objects in Immersive VEs: Effects of Distance, Size, and Visual Feedback". *proceedings of ACM CHI '98*.

POUPYREV, I., BILLINGHURST, M., WEGHORST, S., ICHIKAWA, T. (1996). "Go-Go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in VR". *Proceedings of the 1996 9th ACM Annual Symposium on User Interface Software and Technology, Nov 6-8 1996*. Seattle, WA, USA : ACM, New York, NY, USA. P. 79-80.

ROBERTSON, G., VAN DANTZICH, M., ROBBINS, D., CZERWINSKI, M., HINCKLEY, K., RISDEN, K. et al. (2000). "Task Gallery: a 3D window manager". *CHI 2000 - Conference on Human Factors in Computing Systems 'The Future is Here', Apr 1-Apr 5 2000*. The Hague, Neth : ACM, New York, NY, USA. P. 494-501.

RORKE, M. (2000). *Designing and Implementing a Virtual Reality Interaction Framework*. 114 p. Master Thesis dissertation, Computer Science Department, Rohdes University.

SCHMALSTIEG, D., ENCARNACAO, L.M., SZALAVARI, Z. (1999). "Using transparent props for interaction with the Virtual Table". *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics: Proceedings of the 1999 Symposium on Interactive 3D Graphics, Apr 26-Apr 28 1999*. 147-153.

STOAKLEY, R., CONWAY, M.J., PAUSCH, R. (1995). "Virtual reality on a WIM: interactive worlds in miniature". *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems. Part 1 (of 2), May 7-11 1995*. Denver, CO, USA : ACM, New York, NY, USA . 1, P. 265-272.

WLOKA, M.M., GREENFIELD, E. (1995). "The virtual tricorder: a uniform interface for virtual reality". *Proceedings of UIST '95: 8th ACM Symposium on User Interface and Software Technology, 14-17 Nov. 1995*. Pittsburgh, PA, USA : ACM. P. 39-40.

ANNEXES

ANNEXE 1 : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT ET PERMIS DU COMITÉ D'ÉTHIQUE



*Projet de recherche
avec des sujets humains*

FOURNIR CE DOCUMENT EN 6 COPIES

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

TITRE DU PROJET :

**Étude de performance des interfaces humain-machine à base de panneaux
de dialogue pour des systèmes de réalité virtuelle**

CHERCHEUR PRINCIPAL : MARC BERNATCHEZ

DÉCLARATION

Je, (nom en lettres moulées du sujet) _____

déclare avoir pris connaissance des documents ci-joints dont j'ai reçu copie, en avoir discuté avec (nom du chercheur en lettres moulées)

Marc Bernatchez _____

et avoir compris le but, la nature, les avantages, les inconvénients et les risques de cette recherche.

Après réflexion, je consens librement à participer à cette recherche. Je sais que je peux me retirer de celle-ci en tout temps, sans aucune forme de préjudice. De plus, tous les renseignements obtenus me concernant seront strictement confidentiels, à moins d'une autorisation de ma part ou d'une disposition législative. Pour ce faire, ces renseignements seront conservés sur un média informatique de type CD-ROM

(ex.: codés, sous clé, etc.) et conservés à l'École Polytechnique de Montréal
et à la résidence du responsable ci haut nommé _____

(dans le cas d'une recherche multicentre), pour une durée de 5 années après la fin de la recherche. Par la suite, tous ces renseignements seront détruits.

Cependant, je consens à ce qu'aux fins de vérification de la saine gestion de cette recherche, les personnes suivantes puissent consulter les informations s'y rattachant : un membre du comité d'éthique de la recherche (C.É.R.), et/ou un délégué des autorités gouvernementales de Santé Canada, et/ou un ministère concerné du Québec, et/ou un délégué des organismes commanditaires. Par ailleurs, j'accepte que les résultats de cette recherche puissent être publiés, dans une revue technique ou scientifique, ou communiqués dans le cadre d'un congrès technique ou scientifique, sans que mon anonymat en soit compromis.

Signature du sujet

Date



Comité d'éthique de la
recherche avec des sujets
humains

Le 6 juin 2005.

Adresse civique
Campus de
l'Université de Montréal
2900 Édouard-Montpetit
École Polytechnique
2500 Chemin de Polytechnique
H3T 1J4

Adresse postale
C.P. 6079 succ. Centre-Ville
Montréal (Québec) Canada
H3C 3A7
Téléphone : (514) 340-4852
Télécopieur : (514) 340-4611

École affiliée à
l'Université de Montréal

Membres du comité :

Mme Ginette Denicourt, IRSST
M. Daniel Imbeau, MAGI
M. Bernard Lapierre, MAGI
Dr. André Phaneuf, Fac. Méd. Dent.
Pierre Savard, IGB, président

M. Marc Bernatchez,
Étudiant au doctorat
Génie industriel
École Polytechnique de Montréal

Notre référence : CER-05/06-01

Votre projet : *Étude de performance des interfaces humain-machine à
base de menus flottants pour des systèmes de réalité
virtuelle*

Cher M. Bernatchez,

Nous accusons réception de votre déclaration de projet de recherche
avec des sujets humains. Veuillez noter le numéro de référence du
projet, ci-dessus, et y référer lors de communications ultérieures avec
le comité d'éthique.

Je transmets immédiatement votre déclaration au président du comité
pour analyse et décision. Nous vous contacterons, au besoin, pour
obtenir des précisions sur votre projet.

Cordialement,

Jean Choquette
Coordonnateur administratif

c.c. : Jean-Marc Robert, Directeur de recherche, MAGI
Pierre Savard, Président du Comité
Bernard Lapierre, Éthicien conseil

ANNEXE 2 : QUESTIONNAIRE UTILISATEUR STANDARD**Données biographiques du sujet – Formulaire d’Inscription****Nom :****Prénom :****Courriel :****Identificateur unique du sujet :** (réservé aux responsables – ne rien inscrire)**Age**

- ☐ 18 - 30 ans
- ☐ 31 - 40 ans
- ☐ 41 - 50 ans
- ☐ 51 ans et plus

Genre

- ☐ Homme
- ☐ Femme

Niveau de formation académique

- ☐ Collégial
- ☐ Baccalauréat
- ☐ DESS
- ☐ Maîtrise
- ☐ Doctorat

Expérience générale en informatique

Veuillez indiquer le nombre d’années d’expérience pour chacune des catégories d’expérience informatique suivantes :

Utilisation des systèmes d’exploitation tels que Microsoft Windows et Mac OS

- ☐ Aucune
- ☐ Inférieure à 1 an
- ☐ De 1 an à 4 ans
- ☐ 5 ans à 9 ans
- ☐ 10 ans et plus

Utilisation de logiciels de bureautique (traitement de texte, tableur électronique, mise en page et présentation, ...)

- ☐ Aucune
- ☐ Inférieure à 1 an
- ☐ De 1 an à 4 ans
- ☐ 5 ans à 9 ans
- ☐ 10 ans et plus

Programmation de logiciels informatiques

- ☐ Aucune
- ☐ Inférieure à 1 an
- ☐ De 1 an à 4 ans
- ☐ 5 ans à 9 ans
- ☐ 10 ans et plus

Utilisation de logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO)

- ☐ Aucune
- ☐ Inférieure à 1 an
- ☐ De 1 an à 4 ans
- ☐ 5 ans à 9 ans
- ☐ 10 ans et plus

Utilisation de jeux vidéo

- ☐ Aucune
- ☐ Inférieure à 1 an
- ☐ De 1 an à 4 ans
- ☐ 5 ans à 9 ans
- ☐ 10 ans et plus

Autres (veuillez spécifier à la ligne suivante)

- ☐ Aucune
- ☐ Inférieure à 1 an
- ☐ De 1 an à 4 ans
- ☐ 5 ans à 9 ans
- ☐ 10 ans et plus

Autres expériences (description) :**Expériences antérieures d'utilisation de systèmes de réalité virtuelle**

(Veuillez considérer toute expérience antérieure relative à l'utilisation d'un système de réalité virtuel.)

- ☐ Aucune
- ☐ Inférieure à 1 an
- ☐ De 1 an à 2 ans
- ☐ 2 ans et plus

Veuillez décrire la nature de cette expérience relative à l'utilisation d'un ou de plusieurs systèmes de réalité virtuelle :

Expérience 1**Type d'interface préférée**

Veuillez sélectionner le repère du panneau de dialogue que vous avez préféré durant l'expérience parmi la liste suivante :

- ☐ Statique dans la scène
- ☐ Statique par rapport à la position de l'utilisateur
- ☐ Statique par rapport à la position et à l'orientation de l'utilisateur
- ☐ Statique par rapport à la main non dominante (gauche) de l'utilisateur
- ☐ Statique par rapport à la tête de l'utilisateur

Niveau de fatigue

Temps utilisé pour effectuer l'expérience : (complété par le responsable)

Donnez une évaluation de la sensation de fatigue que vous ressentez après l'expérience.

- ☐ Nulle (aucune fatigue notable)
- ☐ Faible (fatigue difficilement perceptible)
- ☐ Moyenne (sensation de fatigue équivalente à toute autre activité de durée similaire)
- ☐ Forte (difficultés de concentration mais sans douleurs)
- ☐ Très élevée (Causant des douleurs)

Inconfort physiologique

Cocher un ou plusieurs des items suivants s'appliquant. Ne rien cocher si aucun ne s'applique :

- ☐ Sensation de désorientation
- ☐ Sensation de nausées
- ☐ Maux de tête
- ☐ Autres (spécifiez)

Autres :

Expérience 2**Type d'interface préférée**

Veuillez sélectionner la configuration de panneau de dialogue que vous avez préférée durant l'expérience parmi la liste suivante (1 choix par bloc) :

Bloc 1 :

- ☐ Sans changement de couleur du curseur
- ☐ Avec changement de couleur du curseur

Bloc 2 :

- ☐ Sans système de visée
- ☐ Avec système de visée

Bloc 3 :

- ☐ Sans ombrage de la main
- ☐ Avec ombrage de la main

Niveau de fatigue

Temps utilisé pour effectuer l'expérience : (complété par le responsable)

Donnez une évaluation de la sensation de fatigue que vous ressentez après l'expérience.

- ☐ Nulle (aucune fatigue notable)
- ☐ Faible (fatigue difficilement perceptible)
- ☐ Moyenne (sensation de fatigue équivalente à toute autre activité de durée similaire)
- ☐ Forte (difficultés de concentration mais sans douleurs)
- ☐ Très élevée (Causant des douleurs)

Inconfort physiologique

Cocher un ou plusieurs des items suivants s'appliquant. Ne rien cocher si aucun ne s'applique :

- ☐ Sensation de désorientation
- ☐ Sensation de nausées
- ☐ Maux de tête
- ☐ Autres (spécifiez)

Autres :

Expérience 3

Type d'interface préférée

Veillez sélectionner la configuration de panneau de dialogue que vous avez préférée durant l'expérience parmi la liste suivante (1 choix par bloc) :

Bloc 1 :

- ☐ Sans changement de couleur du curseur
- ☐ Avec changement de couleur du curseur

Bloc 2 :

- ☐ Sans système de visée
- ☐ Avec système de visée

Bloc 3 :

- ☐ Sans ombrage de la main
- ☐ Avec ombrage de la main

Niveau de fatigue

Temps utilisé pour effectuer l'expérience : (complété par le responsable)

Donnez une évaluation de la sensation de fatigue que vous ressentez après l'expérience.

- ☐ Nulle (aucune fatigue notable)
- ☐ Faible (fatigue difficilement perceptible)
- ☐ Moyenne (sensation de fatigue équivalente à toute autre activité de durée similaire)
- ☐ Forte (difficultés de concentration mais sans douleurs)
- ☐ Très élevée (Causant des douleurs)

Inconfort physiologique

Cocher un ou plusieurs des items suivants s'appliquant. Ne rien cocher si aucun ne s'applique :

- ☐ Sensation de désorientation
- ☐ Sensation de nausées
- ☐ Maux de tête
- ☐ Autres (spécifiez)

Autres :