



HAL
open science

Référentiels Spatiaux des Tâches d'Interaction et Caractéristiques de l'Utilisateur influençant la Performance en Réalité Virtuelle

Florence Tyndiuk

► **To cite this version:**

Florence Tyndiuk. Référentiels Spatiaux des Tâches d'Interaction et Caractéristiques de l'Utilisateur influençant la Performance en Réalité Virtuelle. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Victor Segalen - Bordeaux II, 2005. Français. NNT: . tel-00162297

HAL Id: tel-00162297

<https://theses.hal.science/tel-00162297>

Submitted on 13 Jul 2007

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

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

THÈSE

pour le

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 2

Mention : Sciences Cognitives

Présentée et soutenue publiquement

Le 2 Décembre 2005

Par TYNDIUK Florence

Née le 08 Novembre 1978 à Bordeaux

**Référentiels Spatiaux des Tâches d'Interaction
et Caractéristiques de l'Utilisateur influençant la Performance
en Réalité Virtuelle**

Membres du jury

Bernard Claverie .	Professeur	Examineur
Philippe Fuchs ...	Professeur	Rapporteur
Pascal Guitton ...	Professeur	Président
Christophe Schlick	Professeur	Directeur de Thèse
Gwenola Thomas .	Maître de Conférence	Examineur
Jacques Tisseau ..	Professeur	Rapporteur

Résumé

En réalité virtuelle, pour adapter les interfaces aux utilisateurs, deux dimensions doivent être étudiées : la tâche et l'utilisateur.

La première concerne les tâches d'interaction en réalité virtuelle, plus particulièrement la manipulation et la locomotion. L'étude et la comparaison des propriétés spatiales des environnements réels et virtuels nous permettent de proposer des modèles hiérarchiques de ces tâches, spécifiant les configurations d'interaction problématiques pour un utilisateur. En fonction de ces configurations problématiques, un concepteur devra contraindre le déplacement ou aider l'interaction. La principale difficulté que nous avons identifiée, est l'adaptation de l'interface aux référentiels spatiaux de l'utilisateur (égocentrique, exocentrique).

La seconde dimension concerne l'identification des caractéristiques de l'utilisateur influençant la performance en fonction de la tâche (locomotion *vs.* manipulation) et de l'interface (immersive visuellement *vs.* peu immersive visuellement). Pour la configuration n'induisant que peu d'immersion visuelle, un écran d'ordinateur et un grand écran sont utilisés, l'angle de vue de l'utilisateur est conservé constant. Cette étude montre l'impact sur la performance d'interaction des capacités spatiales, de la dépendance-indépendance à l'égard du champ et de l'expérience en jeu vidéo, pour différentes interfaces et tâches. Nous montrons notamment qu'un grand écran peut soutenir la performance et minimiser l'influence des capacités spatiales sur celle-ci.

Mots clés : Réalité Virtuelle, Locomotion, Manipulation, Caractéristiques de l'utilisateurs, Référentiels spatiaux.

Abstract

In virtual reality, to adapt interfaces to users, two dimensions must be studied: the task and the user.

The first dimension deals with interaction tasks in virtual reality, more precisely manipulation and locomotion. The study and the comparison of spatial properties of virtual and real environments allow us to propose tasks hierarchical models which show problematical interaction situations for users. Depending on these problematical situations, a designer should be forced movement or help interaction. The main identified difficulty is to adapt the interface to spatial users' frame of reference (egocentric, exocentric).

The second dimension concerns the identification of user's characteristics, which have an influence on performance depending on the task (locomotion, manipulation) and the interface (immersive in a visual way and partial-immersive in a visual way). Concerning the partial-immersive situation, the interface is used with two displays: a desktop monitor or a large display. The field of view is kept constant. This study shows the impact on performance of spatial capacities, field dependence and video game experience, in different tasks and with different interfaces. We show also that a large display can help to have a high level of performance and decrease the impact of spatial capacities impact.

Key Words : Virtual Reality, Travel, Manipulation, Users' characteristics, Spatial frames of reference.

Remerciements

Dès les premières semaines de ma thèse, mon directeur de thèse m'a donnée un précieux conseil qui pourrait se résumer en "*Fais toi confiance et fonce*". C'est ce que j'ai tenté de faire pendant toute cette thèse... J'ai eu la chance que ceux qui m'entouraient me fassent également confiance dans mes directions de recherche et me laissent évoluer à ma guise... Je voudrais tous les en remercier.

En tout premier lieu, je voudrais remercier les professeurs Philippe Fuchs et Jacques Tisseau d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Je vous remercie pour l'intérêt que vous avez montré pour mon travail et pour vos nombreux commentaires. Ils m'ont inspirée de nombreuses pistes de recherches que j'espère pouvoir développer.

Je voudrais également remercier le Professeur Bernard Claverie, directeur du laboratoire de Sciences Cognitives et le Professeur Pascal Guitton, responsable de l'équipe IPARLA, équipe INRIA-Futurs du LaBRI, pour m'avoir accueillie dans leur laboratoire et équipe de recherche. Je vous remercie de m'avoir laissée toute latitude pour trouver ma place au sein de ces deux équipes.

Je tiens également à remercier le Professeur Bernard Claverie d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Je remercie, tout particulièrement, le Professeur Pascal Guitton, pour avoir accepté de présider mon jury de thèse et surtout pour m'avoir aidée à le composer. Merci, pour votre aide précieuse pendant les derniers mois. Je reste persuadée que la soutenance de la thèse vous doit beaucoup.

Je n'oublierai pas mon directeur de thèse, le professeur Christophe Schlick, qui a accepté d'encadrer cette thèse. Je vous remercie d'avoir délaissé votre sujet de recherche habituel pour venir vous intéresser au mien.

Cette thèse n'aurait pu être menée à bien sans la présence de Gwenola Thomas, qui dès mon DEA s'est intéressée à mes travaux... Je te remercie de t'être autant investie dans mon encadrement, de m'avoir supportée et d'avoir fait le pas qui sépare nos disciplines pour venir voir ce qu'il se passe du côté des sciences cognitives. Je tiens surtout à te remercier pour les nombreuses discussions animées que nous avons eues... Elles furent sources de remises en question et riches d'enseignements. Merci.

Je voudrais remercier les membres du laboratoire de Sciences Cognitives et de l'équipe IPARLA pour leur aide et leur soutien durant cette thèse. Je tiens notamment à remercier le Professeur Bernard N'Kaoua, Véronique Lespinet-Najib, Hélène Sauzéon, Benoit Leblanc, Pierre-Alexandre Favier et Martin Hachet pour leurs conseils et leurs relectures. Merci Martin de m'avoir laissée jouer avec ta table. Sans oublier Isabelle et Josy, sans qui la vie serait beaucoup plus compliquée.

Enfin, un laboratoire ne serait pas un laboratoire sans une bande de doctorants et de stagiaires... alors un grand merci à Catriona, Cristiane, Jean-Baptiste, Jérôme, Nicolas, Pierre, Sabine, Sabine, Sarah et tous ceux que j'oublie et que j'ai croisé au cours de ces années... J'aurais une pensée particulière pour Sabine... Merci pour ta patience, ta présence et ton sourire...

Me lancer dans cette thèse fut une décision un peu folle et purement égoïste que j'ai prise il y a quelques années, mais cette décision impliqua aussi ceux qui m'entourent... Je les remercie de m'avoir soutenu dans cette voie.

En tout premier lieu, je tiens à remercier ma famille, plus particulièrement mes parents pour m'avoir donnée le goût des études et m'avoir appris la curiosité... Mais je veux surtout les remercier pour m'avoir soutenue, aidée pendant toutes ces années... Vous m'avez fait confiance et laissez trouver ma voie... bien que les sciences cognitives vous semblent encore obscures...

J'aurais également une pensée pour mon frère, même si cela va le surprendre, je tiens à le remercier pour sa présence discrète à mes côtés.

Je tiens également à remercier pour leur bonne humeur, leur soutien et leur confiance tout ceux qui ont suivi de près ou de loin ce travail, McLolo, Ludo, Nico, Valérie et toute la clique... mais aussi les anciens scico Manu The Bask, Manu, Toinette, Dav'... enfin j'aurais une pensée pour Pascal, David, (et leurs parents), Cathy et Flo. Sans oublier Mathieu, l'ami de toujours, qui une fois de plus n'a pas failli.

Fabrice, ces dernières lignes sont pour toi. Je sais bien que je ne trouverai pas les mots pour t'exprimer ma gratitude pour ton soutien quotidien et sans faille ces derniers mois. Les mots sont trop faibles ou trop personnels pour exprimer mes pensées alors je te dirais simplement merci. Nous avons fait le pari, un peu fou, de soutenir une thèse chacun et d'en même temps vivre une belle histoire... le pari semble gagné... reste à écrire la suite... à quatre mains...

Table des matières

Introduction	1
Partie I : Fondements Théoriques	5
1 Réalité Virtuelle : Définitions, Concepts Clés	7
1.1 Réalité virtuelle	8
1.2 Interaction	10
1.2.1 Définitions et concepts généraux	11
1.2.2 Théorie instrumentale et réalité virtuelle	16
1.3 Immersion	19
1.3.1 Définition	19
1.3.2 Immersion et performances	20
1.3.3 Sentiment de présence	21
1.4 Synthèse	22
2 Tâches d'Interaction	23
2.1 La tâche et les outils d'analyse	24
2.1.1 Définition	24

2.1.2	Les modèles des tâches	25
2.1.3	La théorie de l'action de Norman & Draper (1986)	30
2.2	Les tâches d'interaction en réalité virtuelle	32
2.2.1	La manipulation	33
2.2.2	La navigation	34
2.2.3	Modèle général de l'interaction: navigation et manipulation	42
2.2.4	Synthèse	43
3	Modèle de l'Utilisateur	45
3.1	Le traitement de l'information	46
3.2	Modèles de l'utilisateur utilisés en ingénierie cognitive	47
3.2.1	Modèles prédictifs de la performance	47
3.2.2	Modèles descriptifs du traitement de l'information	50
3.3	Les étapes du traitement de l'information	52
3.3.1	Le traitement perceptif	52
3.3.2	La mémoire de travail	53
3.3.3	Le traitement moteur	57
3.4	Synthèse	58
4	Caractéristiques de l'Utilisateur et Performances	61
4.1	Les capacités spatiales	62
4.1.1	Approche factorielle	63
4.1.2	Approche cognitive: images mentales	65
4.1.3	Capacités spatiales et performance en réalité virtuelle	67
4.1.4	Conclusion	70
4.2	La dépendance-indépendance à l'égard du champ	71
4.2.1	Les styles cognitifs	71
4.2.2	Dépendance-indépendance à l'égard du champ	72
4.2.3	Dépendance-indépendance à l'égard du champ et performance en réalité virtuelle	74
4.2.4	Conclusion	75

4.3	L'expérience des utilisateurs	77
4.3.1	Le modèle des niveaux d'activité (Rasmussen, 1986)	77
4.3.2	Expérience et performance en réalité virtuelle	79
4.3.3	Conclusion	81
4.4	Différences hommes / femmes	82
4.4.1	Différences hommes / femmes et navigation en environnement réel	82
4.4.2	Différences hommes / femmes et performance en réalité virtuelle	83
4.4.3	Conclusion	85
4.5	Synthèse	86
Partie II : Modélisation et Expérimentation		89
5	Modélisation de l'Interaction	91
5.1	Propriétés des environnements et référentiels spatiaux	93
5.1.1	Environnements réels	93
5.1.2	Environnements virtuels	96
5.2	Proposition d'un modèle de l'interaction	104
5.2.1	La locomotion	105
5.2.2	La manipulation	107
5.2.3	Synthèse	111
5.3	Construction et analyse d'interfaces	112
5.3.1	Evaluation d'une interface conçue pour un petit écran: <i>Cosmo Player</i>	113
5.3.2	Construction d'une interface conçue pour un petit écran: <i>IRI</i>	120
5.3.3	Evaluation d'une interface dédiée au mur immersif: le <i>CAT</i>	123
5.4	Synthèse	127
6	Expérimentations	129
6.1	Participants	130
6.2	Performances d'interaction	131
6.2.1	Hypothèses	131
6.2.2	Protocole expérimental	133

6.2.3	Résultats expérimentaux	140
6.2.4	Discussion	141
6.3	Facteurs cognitifs et performances	144
6.3.1	Hypothèses	145
6.3.2	Protocole expérimental	146
6.3.3	Résultats expérimentaux	151
6.3.4	Discussion	158
6.4	Expérience, style cognitif et performances	161
6.4.1	Hypothèses	161
6.4.2	Evaluation de l'utilisateur	162
6.4.3	Résultats expérimentaux	164
6.4.4	Discussion	168
6.5	Synthèse	170
7	Synthèse et Perspectives	173
7.1	La tâche	174
7.1.1	Modèle de l'interaction	174
7.1.2	Gestion des référentiels spatiaux	176
7.2	L'utilisateur	177
7.2.1	Capacités spatiales et taille de l'écran	178
7.2.2	Facteurs généraux	178
	Bibliographie	205
	Annexes	207
	A Questionnaire d'ergonomie	209
	B Questionnaire sur les caractéristiques des sujets	211

Without interaction, we live in absurdity

J. Lanier

Inventeur du terme Réalité Virtuelle

Introduction

Motivations et Objectifs

« *Au départ je devais l'utiliser (un simulateur de vol) pour pouvoir voler, à présent je suis capable de taper 60 mots à la minute* » (Norman, 1998). Par cette réflexion humoristique, Norman a résumé l'un des problèmes cruciaux de la réalité virtuelle : proposer à l'utilisateur une interface adaptée à la tâche et permettant de la réaliser facilement. Pendant longtemps domaine réservé de l'aviation, la réalité virtuelle est désormais accessible à de nombreux secteurs : la robotique, l'architecture, la conception, la médecine, l'éducation, les arts, *etc.* La conséquence directe de ce développement est une diversification des utilisateurs. Désormais, la réalité virtuelle n'est plus réservée aux spécialistes. Par exemple, des musées peuvent proposer à leurs visiteurs de se promener virtuellement dans des bâtiments antiques reconstitués en images de synthèse¹.

L'interface proposée à l'utilisateur va jouer un rôle central dans l'interaction avec cette nouvelle technologie. L'étude exhaustive de toutes les interfaces existantes étant impossible, nous nous limiterons à deux configurations d'interaction : celle basée sur l'utilisation d'écrans d'ordinateurs et celle utilisant des écrans géants (également appelés murs immersifs). La première configuration permet de proposer des applications accessibles au grand public, par exemple, les jeux vidéo ou les applications de conception assistée par ordinateur. La seconde est basée sur

1. Un exemple d'application est l'exposition *du Nil à Rome* dont es extraits sont disponibles sur <http://www-dunilarome.montaigne.u-bordeaux.fr/> (accessible en Septembre 2005).

la projection d'un environnement virtuel sur un mur ou tout autre support de grande taille. Si la surface de projection est suffisamment grande, plusieurs utilisateurs peuvent alors interagir conjointement avec le système de réalité virtuelle. Tous les domaines nécessitant un travail collectif peuvent potentiellement tirer avantage de ce type de technologie (par exemple pour l'élaboration de prototypes automobile, pour la visualisation de molécules, pour la formation). A long terme, l'objectif de cette recherche pourrait être de proposer des interfaces adaptées à ces configurations d'interaction (écran d'ordinateur et écran géant) et utilisables par le grand public. Cependant, avant de pouvoir proposer des interfaces, une réflexion doit être menée sur *la tâche à réaliser*, mais également sur *l'utilisateur potentiel* de cette interface.

La notion de tâche à réaliser a fréquemment été étudiée dans le domaine de l'interaction homme-machine (Card *et al.*, 1983 ; Egan, 1988), par contre, à notre connaissance, rarement dans le champ de la réalité virtuelle. Ces travaux en interaction homme-machine se sont essentiellement focalisés sur les tâches primitives d'interaction (telles que l'acquisition de cible, l'édition de texte ou la recherche d'informations). Nous adoptons une démarche similaire en étudiant les tâches primitives d'interaction en réalité virtuelle : la locomotion et la manipulation. Le premier objectif de cette recherche est donc de proposer une modélisation de la réalisation de ces tâches par un utilisateur. Cette modélisation doit notamment permettre d'identifier les situations d'interaction posant des difficultés à l'utilisateur.

Concernant l'utilisateur, certaines recherches ont montré l'existence de différences inter-individuelles de performances en réalité virtuelle (Stanney *et al.*, 1998 ; Waller, 2000). Pour proposer un système adapté à une majorité d'utilisateurs, il est indispensable de déterminer les causes de ces différences. Il en résulte que le second objectif de cette recherche est d'identifier les caractéristiques de l'utilisateur permettant d'expliquer ou de prédire sa performance.

Organisation du document

Ce document se divise en deux parties. La première, composée des chapitres 1 à 4, présente les fondements théoriques de nos travaux. La deuxième, composée des chapitres 5 à 7, introduit des modèles des tâches d'interaction en réalité virtuelle et une analyse expérimentale des performances de l'utilisateur.

Partie I: Fondements Théoriques

- Le chapitre 1 présente la réalité virtuelle et les concepts clés, l'interaction et l'immersion, qui lui sont associés. L'objectif est de familiariser le lecteur avec la terminologie de ce domaine.
- Le chapitre 2 introduit les définitions et modèles des tâches de réalité virtuelle. La

manipulation et la navigation (plus particulièrement la locomotion), pour lesquelles nous proposerons une modélisation hiérarchique, y seront développées.

- Le chapitre 3 présente les modèles du traitement de l'information issus de l'ingénierie cognitive et de la psychologie cognitive. Ils serviront de support à la proposition d'un modèle de l'utilisateur.

- Le chapitre 4 rapporte les principaux résultats reliant les caractéristiques de l'utilisateur et ses performances en réalité virtuelle. Nous en déduisons des hypothèses sur les caractéristiques de l'utilisateur influençant la performance en réalité virtuelle.

Partie II : Modélisation et Expérimentation

- Le chapitre 5 propose une analyse comparative des propriétés des environnements réels et virtuels et une définition des référentiels spatiaux des utilisateurs. Des modèles des tâches d'interaction en réalité virtuelle seront élaborés. Ces modèles identifieront les situations d'interaction problématiques pour un utilisateur et permettront d'analyser différentes interfaces.

- Le chapitre 6 décrit une expérimentation ayant pour objectif d'étudier la performance en réalité virtuelle en fonction des caractéristiques de la tâche, de l'interface et de l'utilisateur.

- Enfin, le chapitre 7 présente une synthèse de nos travaux. Nous concluons notre travail en proposant des perspectives et des implications concrètes de nos résultats.

Partie I: Fondements Théoriques

Cette première partie présente les fondements théoriques de notre recherche. Nous débuterons en introduisant les définitions et concepts clés de la réalité virtuelle afin de familiariser le lecteur à ce domaine (chapitre 1). Nous poursuivrons en nous intéressant aux deux dimensions principales de notre problématique de recherche: la tâche (chapitre 2) et l'utilisateur (chapitres 3 et 4).

Plus précisément, le chapitre 2 introduira la notion de modèles des tâches ainsi que les définitions des tâches d'interaction en réalité virtuelle (la manipulation et la locomotion). Nous présenterons notamment une modélisation hiérarchique de ces tâches. Nous insisterons également sur la dichotomie entre navigation et locomotion.

L'objectif des chapitres 3 et 4 est de poser des hypothèses concernant les différentes caractéristiques de l'utilisateur influençant sa performance en réalité virtuelle. C'est pourquoi, le chapitre 3 présentera une revue des modèles du traitement de l'information permettant éventuellement de modéliser l'utilisateur, tandis que le chapitre 4 proposera une revue des principales études expérimentales s'intéressant aux caractéristiques de l'utilisateur influençant la performance d'interaction. Les relations entre performances, capacités spatiales, dépendance-indépendance à l'égard du champ, expérience et sexe de l'utilisateur seront particulièrement étudiées. En nous basant sur ces modèles théoriques et ces études expérimentales, nous pourrions alors proposer des hypothèses sur les caractéristiques pouvant influencer la performance d'un utilisateur en réalité virtuelle.

CHAPITRE 1

Réalité Virtuelle : Définitions, Concepts Clés

Traditionnellement, une interface doit permettre à un utilisateur d'agir sur un texte, une image, un document *etc.* Les interfaces de réalité virtuelle ont un objectif plus ambitieux qui est d'*immerger l'utilisateur dans l'environnement virtuel* et de lui permettre des déplacements dans cet environnement (*cf.* figure 1.1). La réalité virtuelle peut donc être considérée comme un nouveau développement de l'*Interaction Homme-Machine, (IHM)*¹. Depuis les années 1970, où apparaissent les premiers *visiocasques*² (Vickers, 1974), la réalité virtuelle a connu un important développement technologique et un surcroît d'intérêts de la part, du grand public comme de la communauté scientifique. Les applications sont désormais nombreuses : construction de prototypes, simulation, conception assistée par ordinateur, aide à la chirurgie, formation, jeux vidéo³ *etc.* La réalité virtuelle est, notamment, entrée dans les laboratoires de recherche comme outil, elle permet désormais de construire des évaluations

1. Ce travail se place dans le cadre de l'*HCI (Human-Computer Interaction)*, la traduction littérale, *Interaction Homme-Ordinateur*, n'est pas usitée en France. Le terme *Interaction Homme-Machine*, couramment utilisé, sera donc employé mais le lecteur devra comprendre *Interaction Homme-Ordinateur*.

2. Le terme *visiocasque* est utilisé comme traduction du terme anglo-saxon *Head Mounted Display*. Une illustration est proposée sur la figure 1.4. Nous reviendrons sur la définition de cette technologie dans la section 1.2.

3. Pour une revue sur les travaux des communautés scientifiques et industrielles françaises, nous renvoyons le lecteur au projet *Perf-RV* (<http://www.perfrv.org/> (accessible en Septembre 2005)) ou au *Traité de la Réalité Virtuelle* (Fuchs & Moreau, 2003).

neuropsychologiques (Schultheis *et al.*, 2002 ; McGee *et al.*, 2000), des protocoles expérimentaux (Loomis *et al.*, 1999 ; Gaggioli, 2003 ; Vidal *et al.*, 2003 ; 2004) ou de traiter des troubles du comportement (Riva *et al.*, 2001 ; Vincelli *et al.*, 2003 ; Botella *et al.*, 2004). Cependant, ces travaux utilisant la réalité virtuelle comme outil restent minoritaires. De nombreux chercheurs la considèrent comme un objet d'étude à part entière. Ainsi, certains auteurs (Mine, 1995 ; Ware, 2000) se consacrent au développement d'interfaces et de techniques d'interaction, pendant que d'autres s'intéressent à l'élaboration de logiciels, d'outils de programmation ou à la création et à la modélisation des environnements virtuels (Arnaldi *et al.*, 2003). Dans cette dernière optique, quelques auteurs vont même jusqu'à peupler l'environnement virtuel d'entités virtuelles autonomes (Tisseau, 2001 ; Magnenat-Thalmann & Thalmann, 2004).

Ces différentes approches, considérant la réalité virtuelle comme objet d'étude, sont essentiellement centrées sur la technologie. Toutefois, dans la lignée des travaux de Morineau (1996), un nouvel axe de recherche centré sur l'utilisateur commence à se développer (Mallot *et al.*, 1999 ; Cutmore *et al.*, 2000 ; Chen *et al.*, 2000 ; Waller, 2000). Notre travail de thèse considère la réalité virtuelle comme objet d'étude et se positionne dans ce courant centré sur l'utilisateur. La réalité virtuelle étant notre objet d'étude, il est primordial de le définir avant de poursuivre notre réflexion, nous nous y employons dans ce premier chapitre.

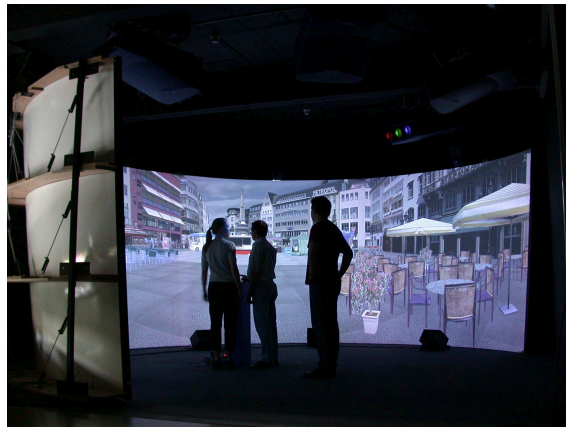


Figure 1.1 – *Projection d'un environnement virtuel sur un écran hémicylindrique*

1.1 *Réalité virtuelle*

Le terme *réalité virtuelle* est employé depuis quelques années, mais le domaine qu'il recouvre ainsi que sa définition ne sont pas clairement précisés (Fuchs *et al.*, 2003). Nous proposons une revue sommaire des principales définitions afin d'extraire et de définir les concepts clés nécessaires à notre réflexion, à savoir, l'interaction et l'immersion.

Dans la communauté française, les définitions de Burdea & Coiffet (1993), Quéau (1993) et de Fuchs *et al.* (2003) sont les plus souvent utilisées ou citées. Ainsi, selon Burdea & Coiffet, un système de réalité virtuelle est « *une interface qui implique une simulation en temps réel⁴ et des interactions via les multiples canaux sensoriels de l'homme (vision, audition, toucher, odorat, goût)* ». Selon ces auteurs, la réalité virtuelle s'inscrit dans le triangle *Immersion-Interaction-Imagination* illustré sur la figure 1.2. L'immersion et l'interaction seront respectivement définies dans les sections 1.3 et 1.2. L'imagination, quant à elle, serait nécessaire à l'utilisateur pour interpréter son interaction avec l'environnement virtuel. Cependant pour Fuchs *et al.* (2003), l'imagination ne doit pas être considérée comme un des concepts clés entrant dans la définition de la réalité virtuelle. En effet, si celle-ci était primordiale, un utilisateur ayant de faibles capacités imaginatives ne pourrait pas interagir avec le système. Bien que les capacités imaginatives semblent pouvoir soutenir l'interaction et le sentiment d'être présent psychologiquement dans l'environnement (Sas & O'Hare, 2001), elles ne doivent donc pas entrer en compte dans la caractérisation de la réalité virtuelle.

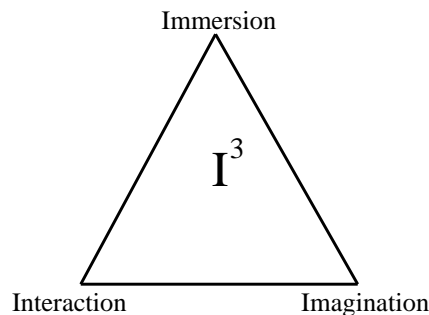


Figure 1.2 – *Le triangle Immersion-Interaction-Imagination selon Burdea & Coiffet (1993)*

Pour Quéau (1993), la réalité virtuelle se définit à travers la notion de monde virtuel. Un monde virtuel est « *une base de données graphique interactive, explorable et visualisable en temps réel sous forme d'images de synthèse tridimensionnelles de façon à donner le sentiment d'une immersion dans l'image* ». Cette définition de Quéau place la technologie au centre de la réflexion et considère peu l'utilisateur. Techniquement, la notion d'image de synthèse tridimensionnelle n'a pas de sens (l'environnement virtuel est affiché sur une surface bidimensionnelle). Ce raccourci sémantique, fréquent en informatique graphique, signifie que la base de données décrivant l'environnement virtuel est organisée dans un espace tridimensionnel. Lorsque cette base de données est visualisée, la profondeur et l'agencement tridimensionnel de

4. Dans une interaction en temps réel, l'utilisateur ne doit pas percevoir de décalage temporel entre son action sur le système et la réponse de ce dernier. Le délai de réponse du système doit être inférieur à 100 millisecondes pour que l'utilisateur ait une impression de temps réel.

l'environnement sont perçus par l'utilisateur⁵. Les termes *monde virtuel*, *environnement virtuel*, *environnement numérique tridimensionnel* sont fréquemment utilisés comme synonymes dans la littérature, nous ferons de même dans ce travail.

Pour compléter ces définitions, Fuchs *et al.* (2003) proposent un nouveau point de vue définissant l'utilité de la réalité virtuelle. Ainsi pour ces auteurs, « *la finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice dans un monde artificiel, qui est soit imaginaire, soit symbolique, soit une simulation de certains aspects du monde réel* ». Cette définition induit l'utilisation d'un certain nombre de techniques : une interaction temps réel, un environnement numérique tridimensionnel et des *interfaces comportementales* (Fuchs *et al.*, 1999 ; 2003). Ces interfaces comportementales informent les utilisateurs sur l'évolution de l'environnement numérique par des stimuli sensoriels et indiquent à l'ordinateur les réponses motrices de l'homme. Une interface comportementale est obligatoirement basée sur des comportements naturels et habituels de l'utilisateur (ce qui n'est pas nécessairement vrai pour une interface classique). Par ce biais, elle soutient l'immersion de l'utilisateur dans l'environnement virtuel.

Ainsi, à travers ces différentes définitions, quatre concepts clés apparaissent comme essentiels pour définir un système de réalité virtuelle : l'interaction, l'immersion, le temps réel et l'utilisation d'un environnement numérique tridimensionnel. La création des environnements numériques tridimensionnels et l'interactivité en temps réel sont essentiellement des problématiques de recherche technologiques et ne font pas l'objet de ce travail. C'est pourquoi, dans les sections suivantes, nous nous concentrons uniquement sur l'interaction puis sur l'immersion dans un environnement virtuel.

1.2 Interaction

L'interaction est apparue comme un concept central des définitions de la réalité virtuelle proposée dans la section 1.1. Nous débuterons en précisant ce terme mais également ceux qui lui sont fréquemment associés tels qu'*interacteurs*⁶, *interfaces*, *techniques et métaphores d'interaction*. Nous poursuivrons en présentant une théorisation de l'interaction en réalité virtuelle proposée par Fuchs *et al.* (2003) et issue de *la théorie instrumentale* de Rabardel

5. La visualisation d'images tridimensionnelles ne nécessite pas obligatoirement l'utilisation de la stéréoscopie (ensemble des techniques mises en oeuvre pour reproduire une perception de la profondeur à partir de deux images planes). Des indices de profondeur insérés dans une image (taille relative des objets, gradient de texture, occultation, perspectives *etc.*) peuvent permettre de reproduire la perception de la profondeur dans une image.

6. Le néologisme *interacteur* est utilisé pour définir l'appareillage permettant de réaliser l'interaction. Nous le préférons au terme *interface* qui regroupe les différents interacteurs et la technique d'interaction permettant cette interaction.

(1995). Cette théorie permet de préciser les conditions d'utilisation d'une interface pour réaliser une activité.

1.2.1 Définitions et concepts généraux

L'interaction permet à l'utilisateur de sélectionner une cible dans l'environnement virtuel, de manipuler un objet ou de naviguer dans cet environnement (Bowman *et al.*, 1998). Il en résulte que l'environnement virtuel doit pouvoir être perçu par l'utilisateur et répondre à ses commandes. Pour cela, l'utilisateur dispose d'*interacteurs moteurs* lui permettant d'agir sur l'environnement virtuel (par exemple : souris, joysticks, gants de données, tapis roulants) et d'un *interacteur sensoriel* lui permettant de le percevoir (par exemple : écrans, visiocasques, murs immersifs, haut-parleurs, diffuseurs d'odeur) (*cf.* figure 1.3). La technologie offre une très grande variété d'interacteurs moteurs et sensoriels, nous en présentons quelques exemples.

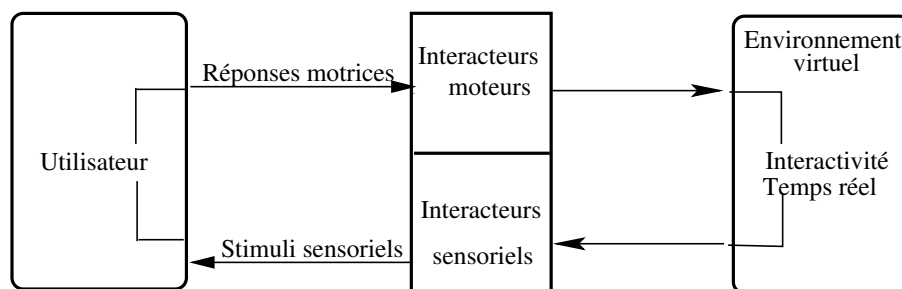


Figure 1.3 – L'interface entre un utilisateur et un environnement virtuel

Interacteurs moteurs et interacteurs sensoriels visuels

Quelques exemples d'interacteurs sensoriels et moteurs sont présentés afin de familiariser le lecteur avec la technologie disponible. Dans un souci de clarté et de concision, nous illustrerons uniquement les interacteurs sensoriels visuels. Le lecteur intéressé par une revue technique détaillée des interacteurs moteurs et sensoriels pourra consulter le *Traité de la Réalité Virtuelle* de Fuchs & Moreau (2003).

Les **interacteurs moteurs** sont très diversifiés et souvent dépendants des interacteurs sensoriels visuels utilisés. Ces interacteurs peuvent être des tapis roulants, des souris, des joysticks, des volants, des boutons interactifs, des objets réels équipés de capteurs de position, *etc.* Par exemple, un chariot de supermarché peut être utilisé pour naviguer dans un magasin

virtuel⁷, un tapis roulant pour se déplacer sur une voie de chemin de fer virtuelle (Lourdeaux, 2001), un ensemble clavier-souris pour naviguer dans un jeu vidéo, un volant pour conduire une voiture virtuelle, un cube en bois couplé à un capteur pour manipuler un objet, *etc.*

Les **interacteurs sensoriels visuels** peuvent être dissociés en deux catégories : les visio-casques et les systèmes permettant la projection d'environnements virtuels sur des écrans de tailles et de formes diverses.

- Les visiocasques sont des casques contenant deux écrans miniatures, chacun positionné devant un œil de l'utilisateur (*cf.* figure 1.4). Classiquement, ce type de technologie est utilisé conjointement avec des capteurs de position disposés sur le casque. Ils détectent la position et l'orientation de la tête de l'utilisateur dans l'environnement réel. Cette position et cette orientation sont ensuite reproduites sur ce que perçoit l'utilisateur de l'environnement virtuel, c'est-à-dire sur son point de vue⁸. Les interacteurs moteurs associés peuvent être, par exemple, des gants de données permettant de reproduire les mouvements de la main de l'utilisateur dans le monde virtuel. L'utilisation des visiocasques peut être problématique pour plusieurs raisons. L'inconvénient majeur est la limitation du champ visuel⁹. En effet, les écrans positionnés devant les yeux ne couvrent qu'environ 50 degrés du champ visuel humain alors que quand la tête et les yeux d'un individu sont fixes, la zone de recouvrement des champs visuels est estimée à 100 degrés (Papin & Fuchs, 2003). Une autre inconvénient est le poids du dispositif qui peut entraîner des douleurs musculaires et des pertes d'équilibres. Enfin, le coût financier de cette technologie reste relativement élevé.

- La deuxième catégorie d'interacteurs sensoriels visuels est basée sur la projection d'une image sur différentes surfaces, de formes et de tailles variables. Le système le plus connu est la *CAVE*¹⁰ (Cruz-Neira *et al.*, 1992) (*cf.* figure 1.5). Dans ce système, l'utilisateur est placé au centre d'une pièce et un environnement virtuel est projeté sur chaque mur (voire sur le plafond et/ou le sol) ce qui a pour conséquence d'immerger visuellement l'utilisateur.

Des systèmes plus simples peuvent, cependant, être utilisés : des écrans géants de plusieurs mètres carrés (également appelé murs immersifs ou écrans hémicylindriques (*cf.* figure 1.6), des

7. Dans le projet, *Magasin Virtuel In Virtuo*, un chariot de supermarché réel a été utilisé pour étudier les comportements d'achat des consommateurs dans un supermarché virtuel : <http://www.invivo-marketing.com/> (accessible en Septembre 2005).

8. Le point de vue de l'utilisateur peut se définir comme ce que verrait l'utilisateur s'il était présent physiquement dans l'environnement virtuel.

9. Le champ visuel se définit comme la région de l'espace vue à chaque instant par l'un ou l'autre œil

10. *CAVE* est un acronyme récursif *Cave Automatic Virtual Environment*. Cet acronyme fait directement référence à l'allégorie de la caverne de Platon (une traduction de Léon Robin est disponible dans l'édition de la *Pleïade* de 1940 (Platon, 1940)). Le terme anglo-saxon *cave* signifiant *caverne*. Dans cette allégorie, le philosophe explore les idées de perception, de réalité et d'illusion en discutant comment des individus infèrent une réalité à travers sa projection sous forme d'ombres sur les murs d'une caverne.



Figure 1.4 – *Exemple de Visiocasque (Image courtesy : www.5DT.com)*

tables virtuelles où l'image est projetée sur une surface de la dimension d'une table telle que l'illustre la figure 1.7. Ces technologies sont de plus en plus développées car elles permettent à plusieurs utilisateurs de visualiser et d'interagir avec un environnement virtuel. Devant ces différents supports, les interacteurs moteurs utilisables sont très variés, un tapis roulant peut être utilisé pour naviguer, un gant de données pour manipuler des objets, mais également des souris, des joysticks, des capteurs de position *etc.* Cependant, il existe, à ce jour, peu d'interacteurs moteurs spécifiquement dédié aux grands écrans (Hachet, 2003). Contrairement aux visiocasques, dans ces applications, le point de vue de l'utilisateur dans l'environnement virtuel n'est pas nécessairement attaché à ses déplacements et à son orientation dans l'environnement réel. Des techniques d'interaction permettant de contrôle du point de vue doivent donc être proposées à l'utilisateur.

Les principaux avantages de ces types d'écrans sont la qualité de l'affichage et la taille du champ visuel qui peut atteindre 360 degrés dans une *CAVE* ou 180 degrés devant un mur immersif. De plus, la mise en place d'un système de ce type requiert uniquement un mur blanc, un vidéo-projecteur et un ordinateur puissant. Il en résulte des coûts financiers de plus en plus abordables.

Les écrans d'ordinateurs classiques, peuvent être considérés comme des cas particuliers de ces systèmes. Les principales différences résident dans la taille et dans la technique de projection utilisée. Devant un petit écran, les interacteurs moteurs fréquemment utilisés sont des souris, des joysticks et des systèmes à base de boutons interactifs.

Dans la suite de ce travail, les interacteurs sensoriels visuels utilisés seront des grands écrans (de 27 m^2 ou de 9 m^2) et des écrans d'ordinateur portable (plusieurs cm^2). Les deux

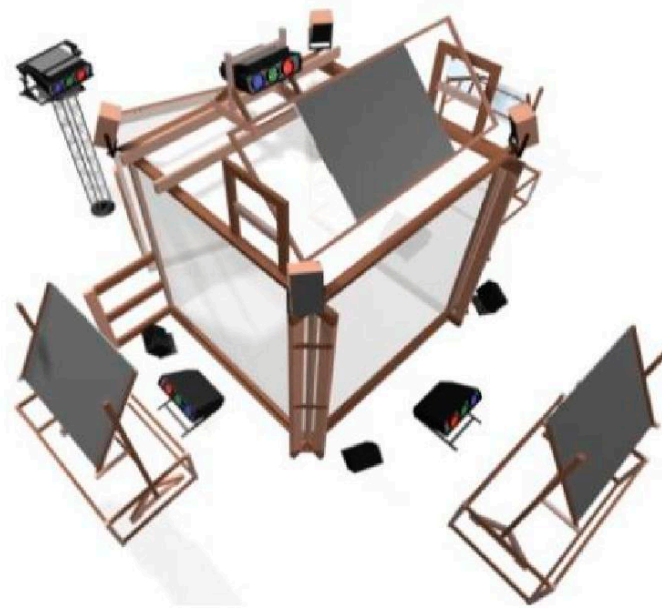


Figure 1.5 – *Fonctionnement de la CAVE*

interacteurs moteurs que nous utiliserons ont été développés dans le cadre de ce travail de recherche ou sont des prototypes en cours de développement. Le premier, *IRI*, *Interface à Représentation Imagée*, est basé sur l'utilisation de la souris et de boutons interactifs (Tyn-diuk *et al.*, 2004). Le second, le *CAT*, *Control Action Table*, peut être assimilé à un volant permettant de contrôler l'interaction (Hachet, 2003). Ces différents interacteurs seront définis plus précisément dans le chapitre 5.

Cependant, les interacteurs seuls ne permettent pas d'interagir avec un environnement virtuel, une technique d'interaction associée à une métaphore doit donc être proposée à l'utilisateur.

Techniques d'interaction et métaphores

Une technique d'interaction permet à un utilisateur d'agir sur l'environnement virtuel à travers l'utilisation d'un interacteur moteur. Elle définit comment le logiciel d'interaction va *interpréter* les actions de l'utilisateur et les retranscrire dans l'environnement virtuel. Du point de vue de l'utilisateur, cette technique d'interaction peut être aussi simple que de sélectionner un bouton de souris, ou aussi complexe qu'une série de gestes. Il est important de noter qu'un même interacteur peut être utilisé avec plusieurs techniques d'interaction et inversement (Bowman, 1999). L'utilisation d'un pointeur laser et d'une souris peut être basée sur



Figure 1.6 – *Projection d'images sur un mur hémicylindrique*



Figure 1.7 – *Table Virtuelle*

la même technique d'interaction (par exemple le *drag-and-drop* ou *glisser-déplacer*¹¹). Ces techniques d'interaction doivent trouver leurs origines dans des métaphores afin de soutenir, la construction, par l'utilisateur d'un lien sémantique entre son action physique dans le monde réel et le résultat de celle-ci dans le monde virtuel. Ces métaphores peuvent se baser sur des comportements naturels, comme par exemple, la marche sur un tapis roulant pour se déplacer dans l'environnement virtuel ou la préhension d'un objet réel avec un gant de données pour manipuler un objet virtuel. Elles peuvent également se baser sur des connaissances ou des croyances antérieures de l'individu. Par exemple, la sélection d'un objet graphique représentant une flèche peut impliquer un déplacement du point de vue de l'utilisateur. Le choix d'une métaphore pertinente contribue notamment à la réduction du temps d'apprentissage et

11. Cette action consiste à sélectionner un objet et à le faire glisser vers une nouvelle destination.

à l'efficacité dans l'interaction. Une interface peut donc être définie comme l'ensemble constitué d'un interacteur sensoriel, d'un interacteur moteur et d'une métaphore associée à une technique d'interaction.

Les définitions que nous venons d'introduire, sont essentiellement tournées vers les interacteurs et les techniques d'interaction. Cependant, les problématiques classiques de l'interaction homme-machine, telles que *l'utilisabilité*¹² du système, se posent également en réalité virtuelle (Gabbard & Hix, 1997 ; Bach & Scapin, 2003 ; Sutcliffe & Kaur, 2000 ; Bowman *et al.*, 2001). Une définition technique de la réalité virtuelle n'est donc pas suffisante. Afin de compléter notre réflexion par un point de vue utilisateur, la théorie instrumentale de Rabardel (1995), et son application dans le cadre de la réalité virtuelle, est introduite.

1.2.2 *Théorie instrumentale et réalité virtuelle*

Le principal modèle théorique de l'interaction en réalité virtuelle est le modèle proposé par Fuchs et ses collaborateurs (Fuchs *et al.*, 1999 ; Fuchs & Burkhardt, 2003) fondé sur la théorie instrumentale de Rabardel (1995). Nous développons dans un premier temps, le modèle de Rabardel, puis dans un second temps celui de Fuchs.

La théorie instrumentale

Pendant longtemps, l'analyse de l'activité des individus s'est centrée sur l'étude de l'individu ou de son activité. La théorie instrumentale de Rabardel (1995) introduit celle de son instrument. Plus précisément, cette théorie tente de modéliser les *Situations d'Activités Instrumentées (SAI)*, c'est-à-dire les relations existant entre un individu, un instrument (un outil, une machine, une interface) et l'objet de l'activité (l'objet vers lequel l'action est dirigée) (*cf.* figure 1.8). Ce modèle fait apparaître la multiplicité et la complexité des interactions entre ces trois pôles. Au-delà des interactions directes *utilisateur-objet* ((1) sur la figure 1.8), d'autres interactions sont étudiées : les interactions *utilisateur-instrument* ((2) sur la figure 1.8), *instrument-objet* ((3) sur la figure 1.8) et enfin les interactions *utilisateur-objet* médiatisées par l'instrument ((4) sur la figure 1.8). Cette analyse des relations montre donc clairement que l'instrument est au centre de l'activité de l'utilisateur.

Selon Rabardel (1995), l'instrument est un artefact¹³ en situation, ce qui signifie que l'instrument est inscrit dans un usage. Il est un moyen de réalisation de l'action. Son utilisation requiert un *schème d'utilisation*. Un schème peut se définir comme une organisation mentale

12. *L'utilisabilité* peut se définir comme étant la facilité d'utilisation, d'apprentissage et de mémorisation d'une application (ISO-9241-11, 1998 ; Bastien & Scapin, 2001).

13. Un artefact désigne en anthropologie, toute chose ayant subi une transformation, même minime, d'origine humaine (les systèmes symboliques sont compris dans cette définition) (Rabardel, 1995).

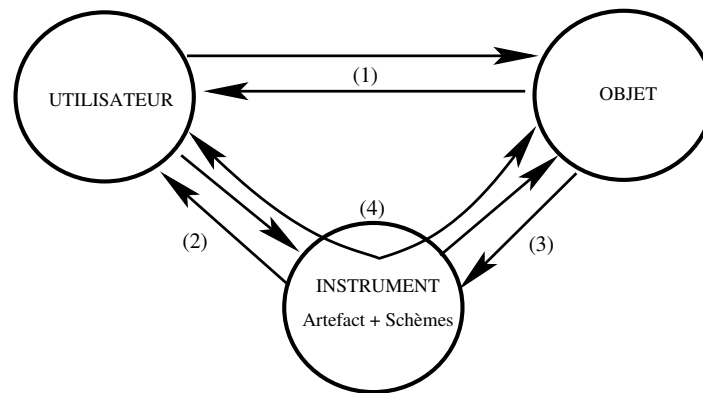


Figure 1.8 – *Le Modèle des Situations d’Activités Instrumentées de Rabardel (1995)*

des caractères généralisables de l’action, permettant de répéter une action dans une situation analogue ou de l’appliquer à de nouveaux contenus (Piaget, 1957). Ces schèmes d’utilisation concernent deux dimensions de l’activité : les activités primaires orientées vers l’objet de l’activité pour lesquelles l’artefact est un moyen de réalisation et les activités secondaires relatives à la gestion des caractéristiques et propriétés particulières de l’artefact. Ces dernières doivent être automatisées afin de permettre à l’utilisateur de se focaliser sur les activités primaires.

A travers la notion d’instrument, les artefacts et les schèmes sont associés mais ils sont également indépendants. Ainsi un même schème d’utilisation peut s’appliquer à plusieurs artefacts, et inversement, un artefact est susceptible de s’insérer dans différents schèmes d’utilisation lui attribuant des significations et des fonctions différentes. Par exemple, le schème de la frappe d’une touche peut s’appliquer à différents artefacts : un clavier d’ordinateur, une machine à calculer, un distributeur de billet *etc.* Inversement un clavier d’ordinateur peut être utilisé avec le schème de la frappe de touche, mais aussi avec celui de la préhension pour le déplacer ou le soulever.

Dans ce travail, les interfaces sont considérées comme des instruments pour réaliser une activité dans un monde virtuel. Les activités secondaires, ou les processus d’utilisation des interfaces, seront au centre de notre réflexion. Cette approche instrumentale a notamment été développée en réalité virtuelle par Fuchs & Burkhardt (2003).

L’approche instrumentale en réalité virtuelle

Fuchs & Burkhardt (2003) proposent d’adapter le modèle des *Situations d’Activités Instrumentées* à la réalité virtuelle. Les trois pôles engagés sont l’utilisateur, l’interface (les interacteurs et leurs techniques d’interaction associées) et le monde virtuel qui est l’objet de

l'activité (*cf.* figure 1.9).

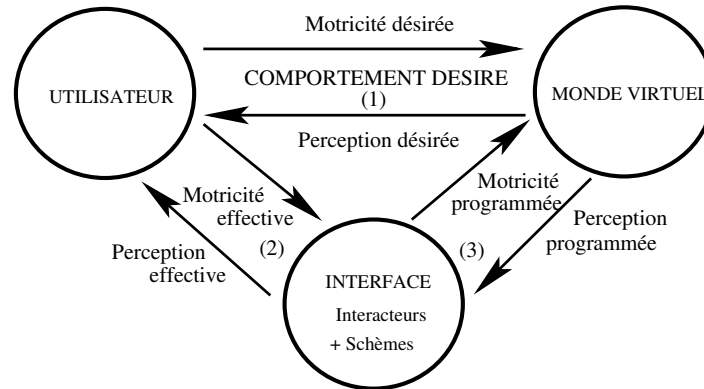


Figure 1.9 – Schéma de l'interaction en réalité virtuelle d'après Fuchs & Burkhardt (2003)

L'interaction en réalité virtuelle a pour objectif principal la réalisation d'un comportement (d'une tâche, d'une activité) dans le monde virtuel. Ainsi, la liaison directe entre l'utilisateur et le monde virtuel ((1) sur la figure 1.9) représente ce *comportement désiré* en termes de motricité et de perception. Concrètement, la réalisation de ce comportement nécessite *une motricité et une perception effectives* entre l'utilisateur et l'interface ((2) sur la figure 1.9), mais également *une motricité et une perception programmées* entre l'interface et le monde virtuel ((3) sur la figure 1.9). L'objectif du concepteur d'une application de réalité virtuelle doit être de minimiser la distance entre le comportement désiré de l'utilisateur et le comportement effectif du monde virtuel. Pour y parvenir, Fuchs & Burkhardt (2003) proposent d'utiliser des *interfaces comportementales*, faisant appel à des schèmes sensori-moteurs préalablement acquis par l'utilisateur.

La première limitation à cette proposition concerne les limites technologiques de la réalité virtuelle et les incohérences sensori-motrices qu'elle peut engendrer. En effet, la perception effective de l'utilisateur est presque toujours partielle et plus ou moins cohérente. Par exemple, la perception du mouvement fait intervenir la vision, la sensibilité aux efforts, l'appareil vestibulaire et le toucher. Or, la majorité des applications stimule uniquement la vision. Il en résulte que les perceptions au niveau des autres sens sont incohérentes avec les informations perçues par le système visuel. De plus, selon l'interacteur choisi, certains types de récepteurs sensoriels ne seront pas stimulés ou du moins pas de manière identique au réel. Ainsi par exemple, peu d'interacteurs permettent d'immerger totalement le regard de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. C'est notamment le cas des visiocasques qui n'immergent qu'environ 50 degrés du champ visuel. Le problème est similaire pour la motricité effective (Fuchs & Burkhardt, 2003), un tapis roulant permet de se déplacer sur une seule dimension.

La seconde limitation est que, dans de nombreux cas, il peut être difficile d'exploiter ou d'identifier un schème. Fuchs & Burkhardt (2003), proposent alors d'employer des *métaphores*. Au lieu d'exploiter un comportement sensori-moteur et acquis de l'utilisateur, il est possible de proposer, par exemple visuellement, une image symbolique de l'action ou de la perception souhaitée. L'utilisation de ce type de métaphore peut être problématique pour l'utilisateur, car il doit en apprendre le sens. L'utilisateur devra faire l'effort de la comprendre et de l'assimiler pour qu'elle devienne par l'usage, un schème d'utilisation.

Cette proposition théorique permet néanmoins de modéliser l'interaction entre un utilisateur et un monde virtuel. L'utilisation efficace de l'interface dépendra du décalage existant entre le comportement effectif et le comportement désiré. Dans le cas où une interface comportementale n'est pas utilisée, ce décalage évoluera et sera minimisé avec l'utilisation du système, jusqu'à ce qu'il disparaisse grâce à l'acquisition d'un nouveau schème d'usage.

Nous venons de définir les principaux termes relatifs à l'interaction : interacteurs, interfaces, techniques et métaphores d'interaction. Pour étoffer ces définitions, l'interaction en réalité virtuelle a été assimilée à une activité instrumentée au sens de Rabardel (1995). L'utilisation de ce modèle met en relief la nécessité de se concentrer sur les processus d'utilisation des interfaces. Ces processus sont mis en jeu pour réaliser une tâche d'interaction, telle que la manipulation d'un objet ou la navigation dans un environnement virtuel. Un deuxième concept clé a été identifié lors de l'étude des définitions de la réalité virtuelle : l'immersion. L'étude de ce phénomène fait l'objet de la section suivante.

1.3 Immersion

Nous débuterons en définissant l'immersion, puis nous étudierons l'impact de ce phénomène sur la performance en identifiant les liens étroits existants entre immersion et sentiment de présence.

1.3.1 Définition

Pour de nombreux auteurs (Burdea & Coiffet, 1993 ; Quéau, 1993 ; Fuchs *et al.*, 2003), une forte interactivité entre l'utilisateur et le système de réalité virtuelle doit conduire à une sensation d'immersion dans le monde virtuel, à une sensation de présence physique dans cet environnement.

Selon Usoh & Slater (1995), dans un environnement virtuel immersif *idéal*, la totalité des entrées sensorielles de l'utilisateur est continuellement suppléée par les stimuli sensoriels issus de l'environnement virtuel. Dans le terme totalité, il faut entendre la totalité des sens, mais

également l'immersion totale de chaque sens. Le degré d'immersion peut donc être qualifié en fonction du sous-ensemble des modalités sensorielles mises en oeuvre dans l'interaction (visuelle, auditive, haptique *etc.*) et par les propriétés des dispositifs d'interaction pour chacune de ces modalités (paramètres du signal, qualité et complétude de la stimulation *etc.*). Par exemple, l'immersion visuelle sera qualifiée de complète quand la totalité du champ visuel de l'utilisateur sera stimulée par l'environnement virtuel, comme dans une *CAVE* (Cruz-Neira *et al.*, 1992). Il est donc possible d'identifier divers type d'immersion en fonction de la modalité sensorielle et également en fonction de qualité de la stimulation. Ainsi des environnements virtuels dits *immersifs visuellement* (utilisant, par exemple, des *CAVEs*) tandis que des environnements *peu immersifs visuellement* (utilisant par exemple des écrans de micro-ordinateurs). Du fait de cette définition, il n'existe pas de véritable mesure du degré d'immersion. Ce dernier est souvent mesuré de façon comparative entre des systèmes plus ou moins immersifs, prenant en compte plus ou moins de modalités sensorielles, en sachant que la modalité sensorielle la plus étudiée est la vision.

1.3.2 *Immersion et performances*

Quelques études expérimentales ont tenté de comparer les performances des utilisateurs entre des configurations reposant sur l'immersion visuelle, généralement basées sur l'utilisation d'un visiocasque, et des configurations peu immersives visuellement, fréquemment basées sur l'utilisation de micro-ordinateurs. Certains auteurs (Adams & Lang, 1995 ; Pausch *et al.*, 1997) ont observé une supériorité de la condition immersive, d'autres (Byrne, 1996) n'ont montré aucune différence, et enfin Morineau (1996) a montré une diminution des performances. Ces résultats contradictoires ne permettent pas de conclure sur les effets positifs ou négatifs de l'immersion. Pour certains auteurs, l'effet bénéfique de l'immersion est dû à l'utilisation d'un nouveau dispositif technique (Adams & Lang, 1995), tandis que pour d'autres auteurs cette nouveauté induirait une diminution des compétences cognitives du sujet (Morineau, 2000). Toutefois, la principale limitation de ce type d'étude est qu'il est difficile, voir impossible, de faire varier uniquement le degré d'immersion sensorielle, même sur une seule modalité. En effet, l'interacteur moteur permettant d'agir sur l'environnement est souvent fortement dépendant de l'interacteur sensoriel utilisé. Il est peu pertinent d'utiliser une souris classique dans une *CAVE* ou devant un mur immersif.

De plus, les systèmes de réalité virtuelle, utilisant l'immersion visuelle, peuvent provoquer le mal des simulateurs (apparenté au mal des transports). Celui-ci peut entraîner la diminution des performances de l'utilisateur (Kolasinski, 1995 ; Stanney *et al.*, 1998). Les principaux symptômes sont une désorientation, des vertiges, des douleurs aux yeux, à la tête, à l'estomac ou des nausées pendant et après l'exposition à l'environnement virtuel. Différentes théories

tentent d'expliquer ce mal des simulateurs (LaViola, 2000). La principale est celle du *conflit visio-vestibulaire*. Le mal des simulateurs résulterait, notamment, des incohérences sensori-motrices entre ce que perçoit le système visuel et ce que perçoit le système vestibulaire. En effet, le système visuel perçoit un mouvement qui n'est pas perçu par le système vestibulaire.

D'après cette remarque, nous pourrions supposer qu'une différence importante existe entre un système peu immersif visuellement et un système immersif visuellement. Cette différence existerait d'un point de vue essentiellement technique. Dans une perspective utilisateur, l'immersion doit être considérée à travers sa capacité à soutenir la réalisation des objectifs de l'utilisateur, avec efficacité et satisfaction. Ainsi, un système reposant sur l'immersion sensorielle peut soutenir un haut niveau de performance pour des apprentissages sensori-moteurs tels que la conduite automobile, tandis qu'une application peu immersive d'un point de vue sensoriel peut permettre de faciliter des apprentissages cognitifs tels que des procédures de vérification des fonctionnalités d'un tableau de bord (Bach, 2004). Dans ce cas, l'utilisation de l'immersion ne garantirait pas un haut niveau de performance. Avant de conclure sur cette notion d'immersion, il est intéressant d'introduire un phénomène fréquemment associé : le sentiment de présence.

1.3.3 *Sentiment de présence*

Si l'immersion se définit, essentiellement, en fonction des modalités sensorielles sollicitées, le sentiment de présence est un phénomène d'ordre psychologique. Il se définit comme le sentiment d'être présent dans l'environnement virtuel (Slater *et al.*, 1995). Du fait de la subjectivité de ce phénomène, les définitions sont multiples (Lombard & Ditton, 1997 ; Schuemie *et al.*, 2001) et dépendent des techniques utilisées pour l'évaluer. Bien que les mesures subjectives basées sur des questionnaires soient les plus fréquemment utilisées (Slater *et al.*, 1995 ; Witmer & Singer, 1998 ; Schubert *et al.*, 1999 ; Lombard, 2000 ; Usoh *et al.*, 2000), des travaux portant sur des mesures objectives ont été réalisés (Sheridan, 1996 ; Prothero & Hoffman, 1995 ; Meehan, 2000). Prothero & Hoffman, par exemple, ont mesuré les réponses des utilisateurs lorsque des informations virtuelles étaient en conflit avec des informations réelles. Plus les utilisateurs étaient perturbés par les informations réelles, moins ils étaient présents dans l'environnement.

De plus, ce sentiment de présence semble dépendre des caractéristiques de l'environnement virtuel : sa richesse, sa cohérence, sa consistance sémantique (Slater *et al.*, 1994 ; Witmer & Singer, 1998). L'environnement virtuel doit être suffisamment crédible pour activer l'imaginaire de l'utilisateur.

La présence n'est pas propre aux environnements provoquant une immersion visuelle, Retaux (2003) l'a observée dans les environnements peu immersifs d'un point de vue visuel de type jeux vidéo. Ce sentiment peut être assimilé à ce que ressent un spectateur absorbé dans

un film, ou un lecteur plongé dans un livre jusqu'à en oublier le monde réel.

Deux hypothèses explicatives de ce sentiment de présence peuvent être retenues. La première relie présence et capacité imaginative (Burdea & Coiffet, 1993 ; Sas & O'Hare, 2001) : plus les utilisateurs auraient de bonnes facultés d'imagination, plus ils se sentiraient facilement présents dans l'environnement virtuel. La deuxième hypothèse est que le sentiment de présence serait relié à l'allocation des ressources attentionnelles des utilisateurs (Witmer & Singer, 1998 ; Bystrom *et al.*, 1999). Ainsi, certains utilisateurs focaliseraient toute leur attention sur l'environnement virtuel jusqu'à en oublier le réel, tandis que d'autres partageraient leurs ressources attentionnelles entre le monde réel et le monde virtuel.

Le sentiment de présence ne sera pas étudié dans ce travail. En effet les environnements virtuels employés sont d'une trop grande simplicité pour engendrer un sentiment de présence mesurable (Witmer & Singer, 1998). Concernant l'étude de l'utilisateur, notre objectif est uniquement d'étudier ses caractéristiques cognitives pouvant influencer sa performance.

1.4 Synthèse

Dans ce chapitre, les concepts clés relatifs à la réalité virtuelle ont été définis. Le débat sur la définition de ce terme restant ouvert, nous avons uniquement identifié les propriétés d'un système de réalité virtuelle et porté notre attention sur les concepts d'interaction et d'immersion.

Ainsi, un système de réalité virtuelle doit permettre une interaction en temps réel avec un environnement tridimensionnel numérique, grâce à des interfaces sensorielles et motrices couplées à des techniques d'interaction. Ce système peut éventuellement soutenir l'immersion visuelle et motrice de l'utilisateur, mais nous considérons qu'un système de réalité virtuelle peut également être peu immersif d'un point visuel et moteur (c'est, par exemple, le cas des jeux vidéo ou des applications accessibles sur internet).

L'identification de ces différentes propriétés de la réalité virtuelle nous a permis de montrer que les techniques d'interaction doivent se baser sur des comportements moteurs familiers des utilisateurs afin de potentialiser leurs performances (Rabardel, 1995 ; Fuchs & Moreau, 2003). Cependant, cette adaptation est souvent difficile pour des raisons matérielles, c'est pourquoi, des études complémentaires sur les processus d'utilisation des interfaces sont nécessaires. Ces processus d'utilisation des interfaces s'expriment essentiellement lorsque l'utilisateur réalise des tâches d'interaction primitives, telles que la sélection, la manipulation, la navigation. Dans le chapitre suivant (chapitre 2), ces tâches de réalité virtuelle sont analysées.

CHAPITRE 2

Tâches d'Interaction

En nous basant sur la théorie instrumentale de Rabardel (1995) et son utilisation dans le cadre de la réalité virtuelle (Fuchs *et al.*, 2003), nous avons montré, dans le chapitre 1, la pertinence d'étudier les processus d'utilisation des interfaces, c'est-à-dire les tâches primitives d'interaction. C'est pourquoi ce deuxième chapitre vise à définir ces tâches et à en proposer une modélisation hiérarchique. Ces modèles seront utilisés dans le chapitre 5.

La première partie de ce chapitre aura pour objectif de familiariser le lecteur avec ce concept de tâche, tel qu'il est classiquement utilisé en ergonomie et en ingénierie cognitive de l'interaction homme-machine. Pour compléter cette définition, les outils (méthodes, formalismes, modèles) existants pour soutenir l'analyse de cette tâche seront sommairement présentés. Ces outils serviront notamment à modéliser l'interaction en réalité virtuelle dans le chapitre 5. Pour étoffer cette réflexion sur la tâche, nous introduirons la *théorie de l'action* de Norman & Draper (1986) permettant d'identifier la différence entre la tâche de l'utilisateur et son activité réelle, notamment cognitive. La seconde partie de ce chapitre traitera plus particulièrement de la manipulation et de la navigation. Les définitions et modèles existants de ces tâches seront présentés ainsi que le modèle générique de l'interaction de Sutcliffe et Kaur (Kaur *et al.*, 1999 ; Sutcliffe & Kaur, 2000) explicitant les liens entre ces deux tâches.

2.1 La tâche et les outils d'analyse

2.1.1 Définition

La tâche peut se définir comme la réalisation d'un but selon une procédure, en respectant un ensemble de contraintes cognitives (limitations, capacités de l'utilisateur *etc.*) et environnementales (matériels disponibles *etc.*) (Boy, 2003). Concrètement, une tâche correspond à une succession définie de sous-tâches ou d'actions connues, réalisables ou du moins envisagées comme telles. Cette tâche peut être qualifiée de prescrite, lorsque son exécution est demandée par une tierce personne (ou par une organisation supérieure) (Boy, 2003 ; Sperandio & Wolff, 2003). Par exemple, les tâches effectuées en laboratoire par un sujet à la demande de l'expérimentateur sont des tâches prescrites. La complexité des tâches dépend, bien sûr, des domaines d'application. Elles peuvent être structurées, routinières et planifiées (comme pour le contrôle d'un processus) ou innovatrices, non structurées, non planifiées, imprévisibles (pour la conception d'un nouveau système), en passant par les stades intermédiaires de complexité.

La réalisation concrète de cette tâche par l'utilisateur correspond à son activité¹ (Boy, 2003 ; Sperandio & Wolff, 2003). Plus précisément, l'activité peut se définir comme l'ensemble des moyens cognitifs ou techniques mis en oeuvre par l'utilisateur pour atteindre les objectifs de la tâche (Kovacs *et al.*, 2004). Cependant seules les activités perceptives et motrices peuvent être observées directement et de manière objective. Le concepteur d'une interface doit, à partir de ces informations, tenter de déterminer les activités cognitives réalisées par l'utilisateur (Kovacs *et al.*, 2004). La théorie de l'action présentée ultérieurement (sous-section 2.1.3) servira de base à cette réflexion.

L'analyse de la tâche peut se définir comme l'identification et la formalisation de la suite d'actions permettant, *en théorie*, la réalisation de la tâche, tandis que celle de l'activité correspond à l'étude des actions réelles effectuées par l'utilisateur. L'analyse de ces tâches et de ces activités fait partie intégrante du cycle de conception d'un système informatique². Le modèle des tâches initial, issu de l'analyse des besoins et/ou de l'analyse des systèmes existants doit être évalué et ajusté à travers l'activité des utilisateurs potentiels à chaque étape du processus de conception jusqu'à ce qu'il soit jugé satisfaisant (Boy, 2003). L'élaboration d'un modèle des tâches final résulte donc de ces deux analyses menées de façon complémentaire et itérative.

1. Cette distinction entre *tâche* et *activité* n'est pas propre au vocable francophone. Les auteurs anglo-saxons la font également, mais en donnant au mot *task* un sens large, celui de buts à atteindre et celui des moyens pour y parvenir, incluant les comportements et les modes opératoires appropriés. Pour désigner l'activité au sens français, ils emploient des termes tels que *behaviors* (comportements), *skills* (habilités), *cognitive process* (processus cognitifs) *etc.* (Boy, 2003).

2. L'objectif de ce travail n'est pas de traiter des différentes méthodes de conception. Le lecteur intéressé trouvera une revue concernant l'élaboration des systèmes d'interaction homme-machine dans Kolski *et al.* (2001).

Pour supporter l'élaboration de ces modèles des tâches, il est primordial de disposer de méthodes ou de formalismes de modélisation.

2.1.2 Les modèles des tâches

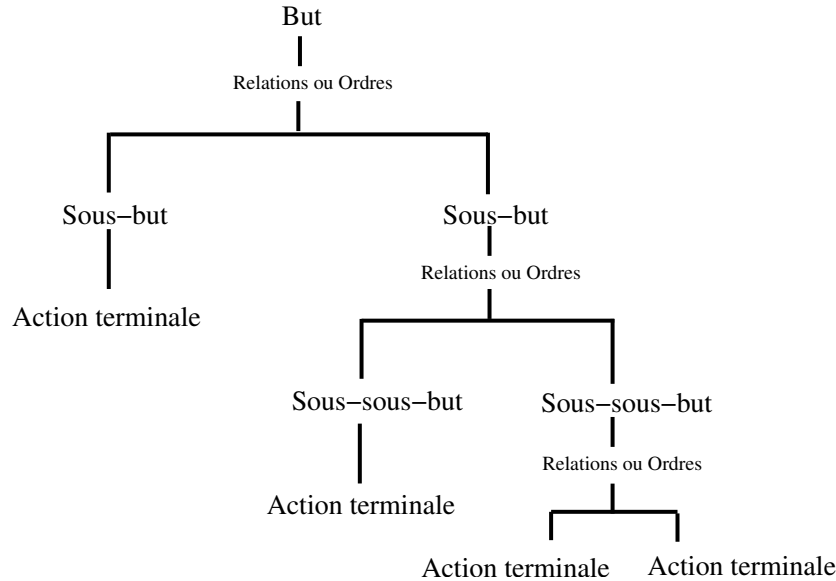
La modélisation de la tâche consiste généralement à décrire la procédure optimale permettant d'atteindre un but. Ce but peut se définir comme un état, différent de l'état initial, qui est atteint par une séquence prédéterminée ou non de sous-buts, d'actions ou d'opérations (Kovacs *et al.*, 2004). Modéliser une tâche consiste donc à recenser l'ensemble des tâches et sous-tâches (ayant chacune des buts et des sous-buts) d'une situation d'interaction et à en montrer l'organisation.

Nous présentons dans un premier temps, les formalismes classiques fréquemment utilisés pour représenter une tâche, puis dans un second temps deux méthodes utilisées en génie logiciel pour analyser et modéliser une tâche : *GOMS* et *MAD* (ou *MAD**).

Formalismes pour représenter une tâche

La représentation de l'organisation d'un ensemble de tâches et sous-tâches est souvent hiérarchique mais un graphe ou tout autre structure appropriée peuvent également servir de support. Quel que soit le formalisme choisi pour représenter une tâche, il doit permettre d'indiquer la façon dont les tâches se subdivisent en sous-tâches, si celles-ci sont ordonnées ou non, dépendantes ou indépendantes, séquentielles ou parallèles, optionnelles ou obligatoires, *etc.* (Boy, 2003). Un exemple de représentation hiérarchique d'une tâche est présenté sur la figure 2.1. Dans cette figure, chaque nœud du graphe représente une tâche, une sous-tâche ou une action élémentaire. Les relations (séquentielle, parallèle) et les ordres de priorité (sans ordre, avec ordre) entre les tâches doivent être spécifiés dans le modèle par exemple à l'aide d'une symbolique adaptée (*cf.* les modèles présentés dans les sous-sections 2.2.1 et 5.2.1).

Un autre formalisme intéressant dans notre problématique est celui des automates. Ce formalisme, plus précisément celui des diagrammes de transition, permet de modéliser les différents états d'un système et les événements permettant un changement d'état. Il a été introduit en interaction homme-machine par Buxton (1990) pour modéliser les différents états d'une interface de saisie graphique (souris, tablette) comme illustré sur la figure 2.2, ou par Fernando *et al.* (1999) pour modéliser la rotation d'un objet. Les états (représentés par des cercles sur la figure 2.2) correspondent aux différents états dans lesquels se trouve le système, tandis que les événements (représentés par des flèches sur la figure 2.2) correspondent aux changements d'états effectués grâce aux actions de l'utilisateur. Cette représentation permet de modéliser la réalisation concrète (physique) d'une tâche grâce à une interface.



Une tâche se définit par son but et les sous-buts ou les actions terminales permettant de l'atteindre. Les relations et les ordres de priorité entre les tâches doivent être spécifiées et sont représentés par une structure arborescente.

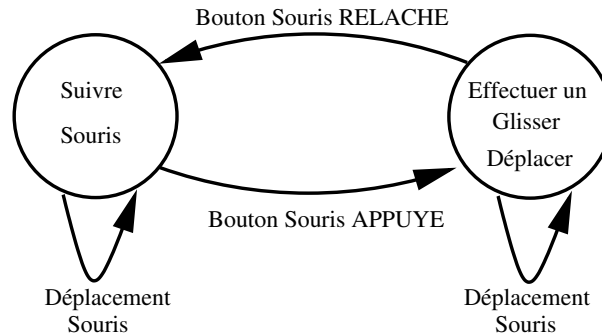
Figure 2.1 – *Exemple de représentation hiérarchique d'après Normand (1992)*

Ainsi, deux formalismes de représentation d'une tâche, au moins, peuvent être réalisés : les arbres hiérarchiques et les automates. Les premiers seront utilisés pour modéliser les tâches de manipulation et de locomotion dans ce chapitre et dans le chapitre 5. Les seconds permettront de caractériser les interfaces utilisées dans le chapitre 5. Nous abordons à présent différentes méthodes de modélisation des tâches.

Méthodes de modélisation des tâches

Lors de la conception d'un système informatique, une méthodologie rigoureuse de modélisation des tâches est nécessaire pour aider le concepteur. De très nombreuses méthodes issues de différentes disciplines (sciences cognitives, théorie des graphes, algèbre, linguistique *etc.*) ont été proposées³. Le lecteur intéressé trouvera des informations relatives à ces méthodes dans les ouvrages de Diaper & Stanton (2004) et Kolski *et al.* (2001).

3. Différentes méthodes de modélisation des tâches ont été proposées, par exemple, *GOMS (Goal, Operators, Methods, Selection)* de Card *et al.* (1983), *CTT (ConcurTaskTrees)* de Paterno (1999), *MAD**, (*Méthode Analytique de Description des tâches*) de Scapin & Pierret (1989), *TKS (Task Knowledge Structures)* de Johnson & Johnson (1991), *DIANE+* de Barthet & Tarby (1996), *MUSE (Methods for USability Engineering)* de Lim & Long (1994), *TOOD, (Task Object-Oriented Description)* de Mahfoudhi *et al.* (2001) *etc.*



Chaque cercle représente un état du système. Les flèches représentent les événements permettant les changements d'état ou de rester dans l'état courant.

Figure 2.2 – Exemple de diagramme d'état représentant le déplacement d'un objet graphique avec une souris d'après Buxton (1990)

A titre d'exemple, nous présentons les deux principales méthodes (selon Limbourg & Vanderdonckt (2004)) issues du champ des sciences cognitives et de la psychologie : *GOMS* (*Goal, Operators, Methods, Selection*) de Card *et al.* (1983) et *MAD* (ou *MAD**, *Méthode Analytique de Description des tâches*) développée par Scapin & Pierret (1989), Sebillotte (1994) et Scapin & Bastien (2001).

- La méthode *GOMS* a été proposée par Card *et al.* (1983), à la suite du modèle du processeur humain qui sera détaillé dans le chapitre 3. Cette méthode a fait l'objet de nombreux développements. Il est fréquent de parler de la famille des méthodes de conception *GOMS*⁴. Dans ce travail, uniquement la méthode originelle, appelée *GOMS* ou *CMN-GOMS* est présentée. Elle propose de découper l'analyse d'une tâche en quatre ensembles :

1. **les buts** qui correspondent à l'état du système que l'utilisateur doit atteindre ;
2. **les opérateurs** qui sont les opérations élémentaires utiles pour réaliser un *but* ;
3. **les méthodes**⁵ qui sont la suite d'opérateurs permettant d'atteindre un *but* ;
4. **les règles de sélection** qui décrivent le choix d'une *méthode* lorsque plusieurs *méthodes* permettent de réaliser un même *but*.

Pour illustrer cette méthode *GOMS*, un exemple, basé sur le déplacement d'un curseur, est présenté dans le tableau 2.1. Dans cet exemple, un utilisateur doit déplacer son curseur du

4. Les principales méthodes de cette famille *GOMS* sont *KLM* (*Keystroke Level Model*) (Card *et al.*, 1983), *CMN-GOMS* (*Card-Moran Newell GOMS*) (Card *et al.*, 1983), *CPM-GOMS* (*Cognitive Perceptual and Motors operations*) (John, 1990) et *NGOMSL* (*Natural GOMS Language*) (Kieras, 1988). Le lecteur trouvera une revue sur ces méthodes dans Carroll (2003) et John & Kieras (1996).

5. Le terme méthode employé ici ne fait pas référence aux méthodes de modélisation, mais aux opérateurs permettant d'atteindre un *but*.

haut de l'écran vers une nouvelle position. Il dispose de deux *méthodes* : la *Méthode Clavier* qui consiste à déplacer le curseur ligne par ligne et colonne par colonne grâce aux touches du clavier et la *Méthode Souris* qui permet de déplacer le curseur avec la souris. La *règle de sélection* indique que l'utilisation de la *Méthode Clavier* n'est pertinente que si le curseur est proche de la position à atteindre, sinon il vaut mieux utiliser la *Méthode Souris*.

Cette modélisation peut être complétée par l'utilisation du *Keystroke Level Model* de Card *et al.* (1983) qui permet de prédire le temps d'exécution de chaque *opérateur* afin de comparer les temps de réalisation de la tâche en fonction de la *méthode* sélectionnée. La principale critique faite à cette modélisation est que les auteurs postulent l'efficacité maximale de l'utilisateur, elle ne permet pas de rendre compte des erreurs. Ainsi, dans notre exemple, la configuration où l'utilisateur frappe, par erreur la touche \Leftarrow n'est pas considérée.

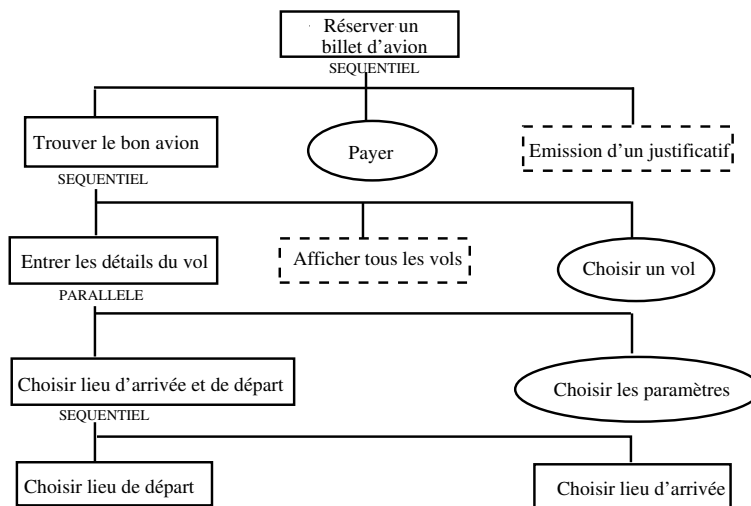
<i>But</i>	déplacer curseur du haut de la page vers nouvelle position
<i>Opérateurs</i>	frapper la touche \Downarrow ; frapper la touche \Rightarrow prendre souris; déplacer souris; sélectionner avec souris
<i>Méthodes</i>	Méthode Clavier : tant que le curseur n'est pas sur la bonne ligne, frapper la touche \Downarrow ; tant que le curseur n'est pas dans la bonne colonne, frapper la touche \Rightarrow Méthode Souris : prendre souris, Déplacer Souris sélectionner avec souris la nouvelle position du curseur
<i>Règles de Sélection</i>	si le curseur est proche de la position à atteindre utiliser la Méthode Clavier sinon utiliser la Méthode Souris

Tableau 2.1 – Description du déplacement d'un curseur dans un éditeur de texte en utilisant la méthode GOMS

- La deuxième méthode présentée est la méthode *MAD*. La première définition de *MAD* a été proposée par Scapin & Pierret (1989) et Scapin & Pierret-Golbreich (1990). Elle a ensuite été modifiée en *MAD** (Gamboa Rodriguez, 1998 ; Hammouche, 1995). Les méthodes *MAD* et *MAD** sont plus complexes que *GOMS*, elles visent à l'étude et à la réalisation complète d'un système informatique. Plus précisément, ces auteurs se sont donnés comme objectif de considérer la façon dont l'utilisateur se représente sa tâche, de prendre en compte les aspects contextuels, sémantiques et procéduraux et de permettre une implémentation⁶ aisée (Scapin & Bastien, 2001). Dans *MAD* (ou *MAD**) les tâches sont décomposées de façon hiérarchique et sont reliées par des relations temporelles (tâches séquentielles, parallèles, simultanées *etc.*) et logiques (et, ou *etc.*) associées à la représentation graphique.

6. Le terme *implémentation* est un anglicisme utilisé dans les publications anglo-saxonnes pour désigner l'étape de programmation au sens strict (traduction en langage informatique). Ce mot est fréquemment usité dans la communauté informatique française.

Un exemple de cette décomposition, appliqué à un système informatique de réservation d'un billet d'avion, est proposé sur la figure 2.3. Une tâche est représentée comme un arbre où les nœuds sont des tâches, des sous-tâches ou des actions élémentaires. Chaque tâche, sous-tâche ou action élémentaire est caractérisée par son nom et par un certain nombre d'informations additionnelles. Ces informations sont : le but de la tâche, l'état initial, l'état final du système, les pré-conditions, les post-conditions de réalisation de la tâche et des attributs. Les attributs indiquent si la tâche est itérative, facultative, prioritaire *etc.* Le lecteur trouvera des exemples concrets d'application de cette méthode dans Bastien & Scapin (2001), Gamboa Rodriguez (1998) et Jambon (1996). Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est centrée sur l'activité de l'utilisateur. Son ambition, à terme, est de proposer des spécifications ergonomiques en fonction de la modélisation de la tâche (Tricot & Nanard, 1998). Par exemple, si deux tâches sont identifiées comme parallèles, leur réalisation devrait être proposée à l'utilisateur au même instant.



Les rectangles en traits pleins représentent les tâches, les ovales représentent des tâches pouvant être décomposées en sous-tâches, les rectangles en traits discontinus les actions du système, les mots clés SÉQUENTIEL ou PARALLÈLE indiquent l'agencement des tâches

Figure 2.3 – Extrait d'une description d'une tâche de réservation d'un billet d'avion selon la méthode MAD* issue de Diaper & Stanton (2004)

Ainsi, quelle que soit la méthode de modélisation choisie, elle repose sur une identification des buts et des sous-butts de la tâche, des opérateurs, ainsi que des outils permettant de les réaliser. Dans la majorité des méthodes de modélisation, ces buts et sous-butts sont représentés grâce à des arbres hiérarchiques. Cette décomposition des tâches sous forme d'arbres hiérarchiques sera utilisée dans ce travail (*cf.* les sous-sections 2.2.1 et 5.2.1). Par contre, les méthodes MAD* et GOMS ne seront pas appliquées, puisqu'elles sont essentiellement utilisées

pour la conception et l'évaluation globale des systèmes informatiques. Ce travail se limitant à l'étude des tâches d'interaction en réalité virtuelle, il est difficile de mener à terme de telles démarches.

Avant de poursuivre sur l'analyse des tâches d'interaction, remarquons que ces différentes méthodes ne permettent pas d'étudier et de modéliser les représentations cognitives de l'utilisateur, ni les processus cognitifs mis en jeu pour la réalisation des tâches. La théorie de l'action de Norman & Draper (1986) tente de répondre à cette critique grâce à la notion de modèle mental et à l'étude de la planification de l'action. Nous la présentons succinctement.

2.1.3 La théorie de l'action de Norman & Draper (1986)

Entre la tâche prescrite et la tâche réalisée par l'utilisateur, différentes tâches intermédiaires peuvent être distinguées : la tâche prescrite telle que l'utilisateur se la représente, telle qu'il se la redéfinit, telle qu'il la réalise effectivement et enfin telle qu'il s'en représente le résultat. Selon Sperandio & Wolff (2003), ces différentes tâches peuvent être considérées comme différents modèles de l'activité et dépendent du modèle mental que l'utilisateur se construit. Cette *théorie des modèles mentaux* est issue des travaux de Johnson-Laird (1983). Selon lui, un modèle mental se définit comme une représentation interne d'un état du monde que se construit un individu. Les modèles mentaux peuvent se définir comme des représentations conceptuelles et opérationnelles internes que les individus développent pour interpréter et expliquer leur propre comportement. Ils sont fonctionnels, incomplets et construits à partir des connaissances et des croyances des individus (Johnson-Laird, 1983).

Du point de vue de l'interaction homme-machine, plusieurs auteurs se sont intéressés à cette théorie des modèles mentaux pour définir les représentations de l'utilisateur ou du concepteur (Norman, 1983 ; Young, 1983 ; Norman & Draper, 1986 ; DiSessa, 1986). Les principales différences entre ces auteurs sont d'ordre terminologique. Nous développons uniquement celles de Norman & Draper (1986), qui servent de base théorique à la théorie de l'action. Pour ces auteurs, deux modèles mentaux entrent en jeu dans le cadre de l'utilisation d'une interface : le *modèle de conception* qui correspond au modèle mental du concepteur, à la façon dont il se représente le système, et le *modèle de l'utilisateur* qui correspond au modèle mental que l'utilisateur développe à travers son interaction avec le système.

Ces différents modèles peuvent évoluer en cours de conception et d'utilisation du système. Dans l'idéal, le modèle du concepteur et celui de l'utilisateur devraient être équivalents. Ces deux modèles communiquent à travers l'*image du système*, c'est-à-dire à travers la partie visible du système, ce que voit l'utilisateur du fonctionnement du système. Il en résulte que si cette image du système ne rend pas le modèle de conception clair et cohérent pour l'utilisateur, alors ce dernier peut se construire un modèle mental erroné et donc éprouver des difficultés pour

utiliser ce système. L'interface du système doit donc représenter le plus fidèlement possible l'état du système, tout au long de l'interaction, et ceci afin de réduire les risques qu'une application soit dans un état donné alors que l'utilisateur l'imagine dans un autre état.

A la suite de la définition de ces deux modèles, Norman & Draper (1986) ont développé une théorie de la planification de l'action : *la théorie de l'action*. Cette théorie propose de modéliser la réalisation d'une action dirigée par un but, construit par l'utilisateur en fonction de son modèle mental, en sept étapes illustrées par la figure 2.4.

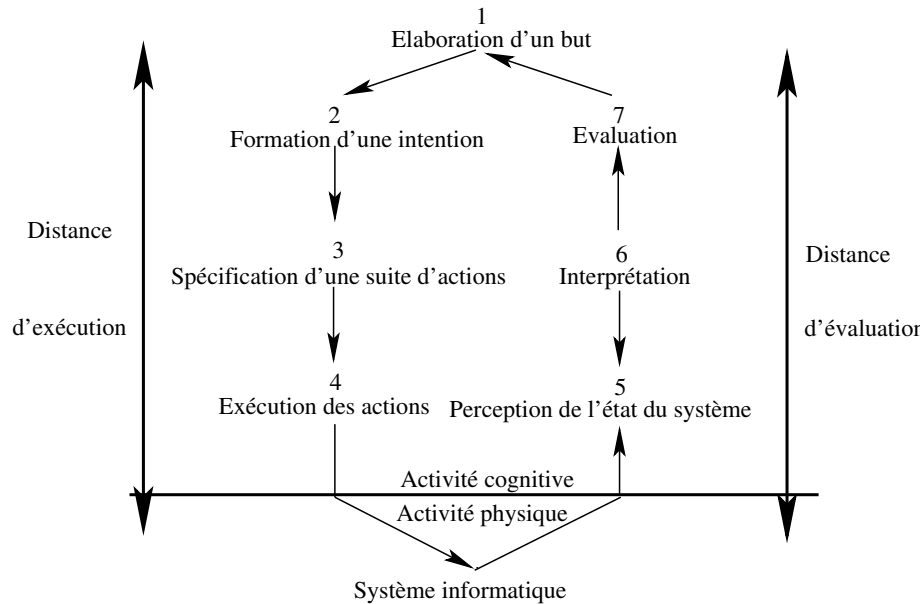


Figure 2.4 – Les étapes de l'élaboration d'une action selon Norman & Draper (1986)

1. **L'établissement d'un but** dépend du modèle mental que l'utilisateur se fait du système et de la tâche qu'il doit réaliser. Si le but n'est pas directement réalisable, l'utilisateur doit planifier son activité en décomposant le but en une hiérarchie de sous-buts plus simples.
2. **La formation d'une intention** résulte de l'évaluation par l'utilisateur de la distance entre son but et l'état du système. Pour connaître cet état, l'utilisateur doit traduire ce qu'il perçoit du système en fonction de son modèle mental de la situation.
3. **La spécification d'une suite d'actions** vise à concrétiser l'intention de l'utilisateur. Il doit se construire une représentation mentale de ses actions, de leur ordonnancement en fonction des dispositifs physiques dont il dispose pour atteindre son but.
4. **L'exécution des actions** conduit à l'exécution du plan d'actions et aux changements de l'état physique du système. Elle met en jeu le savoir-faire moteur et la mémoire procédurale de l'utilisateur.

5. **La perception de l'état du système** consiste pour l'utilisateur à traduire les changements physiques du système en fonction de son modèle mental de la situation.
6. **L'interprétation** détermine la signification de ce qui a été perçu à l'étape précédente. Elle correspond à la mise à jour de la représentation mentale de l'état actuel du système afin qu'elle s'accorde avec les changements constatés.
7. **L'évaluation** établit la relation entre le but initial de l'utilisateur et son interprétation de la situation actuelle. Cette évaluation peut amener l'utilisateur à une révision du plan et la production de nouveaux buts.

L'intérêt de cette théorie réside dans l'identification de la distance entre un but tel qu'il est conçu par l'utilisateur et sa réalisation dans le système. Deux distances peuvent être distinguées : la distance d'exécution et la distance d'évaluation. La première exprime la différence entre le but d'une action selon le modèle mental de l'utilisateur et la manière dont elle s'effectue réellement dans le système informatique. La seconde exprime la différence entre l'état apparent du système et le modèle mental de l'utilisateur.

Cette théorie de l'action de Norman & Draper (1986) permet d'appréhender les processus cognitifs mis en jeu lors de la réalisation d'une tâche. Elle met en avant l'existence des distances d'exécution et d'évaluation entre l'utilisateur et le système. L'objectif du concepteur d'une interface doit être de les réduire. Au contraire des modèles des tâches, cette théorie de l'action ne fournit pas de spécification formelle ou de méthode d'analyse. Néanmoins, elle permet de spécifier l'importance du modèle mental de l'utilisateur dans l'interaction homme-machine.

Dans la section suivante, les tâches d'interaction en réalité virtuelle seront étudiées en nous basant sur les concepts, formalismes et modèles que nous venons de définir, notamment les représentations hiérarchiques des tâches, ainsi que la théorie de l'action.

2.2 Les tâches d'interaction en réalité virtuelle

En réalité virtuelle, quatre tâches élémentaires sont identifiées : le contrôle du système qui permet d'effectuer l'ensemble des opérations de gestion de l'application, la sélection d'une cible, la manipulation d'un élément de l'environnement virtuel et la navigation dans cet environnement (Bowman *et al.*, 1999).

Dans ce travail de recherche, nous nous focalisons sur deux tâches : la manipulation et la navigation. Fréquemment, dans la littérature, l'étude de ces tâches est centrée autour des métaphores d'interaction et des interfaces utilisées pour les réaliser (Zhai & Milgram, 1993 ; Poupyrev *et al.*, 1998 ; Bowman *et al.*, 1998). Dans le cadre de cette recherche, nous nous

concentrons uniquement sur les définitions et modèles de ces tâches dans le contexte de la réalité virtuelle⁷.

Dans un premier temps, la tâche de manipulation sera étudiée, et dans un second temps celle de navigation qui se décompose en deux sous-tâches : la locomotion et la recherche d'itinéraire. Ces études ont pour objectif de proposer une modélisation hiérarchique des tâches de manipulation et de locomotion et d'étudier un modèle de la tâche de recherche d'itinéraire. En conclusion, le modèle de Sutcliffe et Kaur (Sutcliffe & Kaur, 2000 ; Kaur *et al.*, 1999) explicitant les liens entre navigation et manipulation sera introduit.

2.2.1 La manipulation

Une des interactions principales en réalité virtuelle est la manipulation d'objets virtuels (Bowman & Hodges, 1997). Foley et ses collaborateurs (Foley *et al.*, 1984 ; 1992) proposent de regrouper sous le terme *manipulation* différentes sous-tâches, telles que sélectionner une cible, positionner, orienter un objet ou saisir une chaîne de caractères. D'autres auteurs proposent également de considérer comme des tâches de manipulation, les tâches de réduction et d'agrandissement (Mine, 1995) ou de tracé de traits (Buxton, 1990). Cependant, en réalité virtuelle, la tâche de manipulation se limite souvent à la sélection d'un objet virtuel et à son déplacement. Celui-ci nécessite de spécifier la position et l'orientation de l'objet selon les trois dimensions de l'environnement virtuel (Bowman & Hodges, 1997). L'utilisateur doit alors contrôler six degrés de liberté (trois pour la position, trois pour l'orientation). Certaines interfaces proposent l'utilisation conjointe et simultanée des six degrés de liberté (comme par exemple une souris 3D), mais celles-ci peuvent s'avérer difficiles à utiliser pour des utilisateurs novices (Stanney, 1998). D'autres interfaces proposent une utilisation sérielle ou contrainte (Kitamura *et al.*, 1996) des degrés de liberté (comme par exemple une interface à base d'icônes).

Dans cette recherche, nous nous intéresserons principalement aux travaux de Poupyrev (Poupyrev *et al.*, 1997 ; 1998 ; Poupyrev & Ichikawa, 1999). Ils portent essentiellement sur l'étude de la manipulation à une seule main dans le cadre de l'utilisation d'un visiocasque (équipé d'un capteur de position) et d'un gant de données (ou d'un capteur de position posé sur la main de l'utilisateur). Grâce à cette technologie, une main virtuelle est représentée dans l'environnement virtuel, lorsque l'utilisateur effectue un mouvement de la main dans le monde réel, celui-ci est reproduit sur la main virtuelle. Dans cette configuration technique, la manipulation en environnement virtuel est relativement similaire à celle en monde réel, puisqu'elle est basée sur les schèmes moteurs de la préhension et de la manipulation d'objets. Une extension de cette technique (le *go-go* développé par Poupyrev *et al.* (1996)) peut également

7. Les modèles génériques de navigation en environnement électronique comme ceux de Jul & Furnas (1997) ou de Spence (1999) ne seront pas traités.

permettre de s'extraire des contraintes du réel en permettant la sélection d'objets éloignés de l'utilisateur.

Les travaux de Poupyrev *et al.* (1997) ont notamment permis de définir plus précisément les tâches de positionnement et d'orientation.

Ainsi, la tâche de positionnement peut se définir comme la tâche de déplacement d'un objet d'une position initiale vers une position finale (McCormick, 1970). L'exécution de cette tâche peut généralement être dissociée en trois phases distinctes : la sélection de l'objet, son déplacement grossier et son déplacement fin (McCormick, 1970 ; Rory, 1996) (*cf.* figure 2.5). Les paramètres caractérisant la tâche sont donc la position initiale et la position finale de l'objet (en terme de distance et de direction par rapport au point de vue de l'utilisateur) ainsi que la précision requise pour le positionnement.

La tâche d'orientation, quant à elle, consiste à orienter un objet d'une orientation initiale vers une orientation finale. Cette tâche est similaire à celle de positionnement. Elle consiste à la sélection d'un objet, son orientation grossière et son orientation fine (*cf.* figure 2.5). Les paramètres sont la direction et la distance de l'objet par rapport au point de vue de l'utilisateur, mais également les orientations initiales et finales de l'objet et la précision requise.

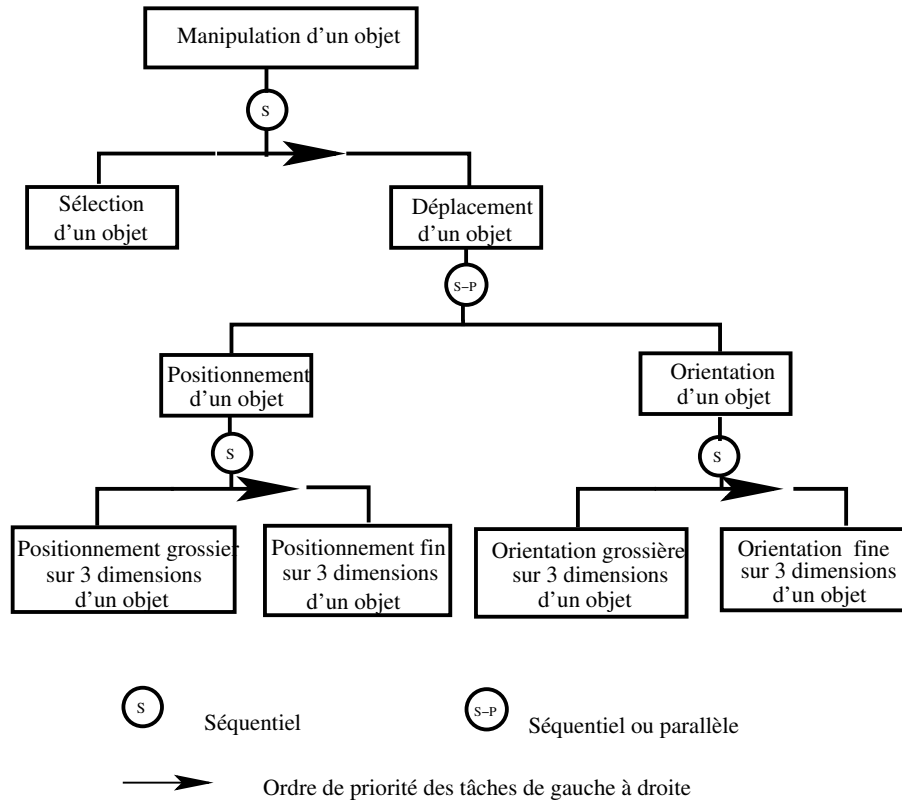
Bien que les études présentées aient été effectuées dans un contexte technique spécifique (visiocasque et capteur de position) et se focalisent essentiellement sur l'interaction à une main, elles nous permettent de proposer une modélisation de la tâche de manipulation quelle que soit la technique d'interaction utilisée. Cette modélisation est illustrée sur la figure 2.5.

Nous poursuivons notre analyse des tâches d'interaction en réalité virtuelle, en étudiant la tâche de navigation. Nous reviendrons sur cette tâche de manipulation en montrant les liens qu'elle entretient avec celle de navigation à travers le modèle de Sutcliffe et Kaur (Sutcliffe & Kaur, 2000 ; Kaur *et al.*, 1999).

2.2.2 La navigation

Traditionnellement la littérature identifie trois tâches de navigation (Darken & Sibert, 1996) : (i) l'exploration de l'environnement virtuel (sans but ni cible explicite), (ii) la recherche d'une cible dont la position est inconnue (aussi appelée recherche naïve) ou connue (aussi appelée recherche amorcée), et enfin (iii) la manoeuvre qui implique des mouvements courts et précis.

Comme pour la manipulation, l'objectif est de proposer un modèle hiérarchique de la tâche de navigation. Cependant cette tâche est différente de celle de manipulation. En effet, la navigation (en environnement réel ou virtuel) peut se diviser selon deux composantes : la



La tâche de positionnement peut être réalisée avant la tâche d'orientation ou après. Les sous-tâches de déplacement (positionnement et orientation) sont réalisées de façon séquentielle ou parallèle en fonction du dispositif technique utilisé. S'il permet l'utilisation conjointe des six degrés de liberté, alors les sous-tâches peuvent être réalisées en parallèle, sinon elles sont réalisées séquentiellement.

Figure 2.5 – *Modèle hiérarchique de la tâche de manipulation*

composante motrice ou *locomotion*⁸ et la composante cognitive ou *recherche d'itinéraire*⁹.

La composante motrice peut se définir par l'ensemble des mouvements devant être effectués pour déplacer le point de vue de l'utilisateur de la position courante vers la position cible. Le point de vue de l'utilisateur correspond à la vue subjective qu'aurait l'utilisateur s'il était physiquement présent dans l'environnement virtuel. La composante cognitive est le processus cognitif de planification de la trajectoire.

Cette conception de la navigation en deux composantes doit être modulée. Lorsque des individus naviguent dans des environnements réels ou virtuels, ils ne séparent pas explicitement la navigation en fonction de ces deux composantes. Les individus doivent constamment recueillir des informations provenant de l'environnement, planifier leurs mouvements et les exécuter (Bowman *et al.*, 1999). Cette dichotomie sera néanmoins poussée à l'extrême en

8. Le terme *locomotion* est proposé comme traduction du terme anglo-saxon *travel*.

9. Le terme *recherche d'itinéraire* est proposé comme traduction du terme anglo-saxon *wayfinding*.

considérant que chacune de ces composantes peut être considérée comme une tâche : la tâche de locomotion consistant uniquement à déplacer le point de vue en utilisant un interacteur moteur et la tâche de recherche d'itinéraire consistant à se repérer dans l'environnement. L'objectif de cette sous-section est de proposer un modèle hiérarchique de la tâche de locomotion et un modèle du processus cognitif de recherche d'itinéraire.

Dans un premier temps, les définitions et modèles relatifs à la tâche de locomotion seront présentés. Puis, dans un second temps nous nous concentrerons sur la tâche de recherche d'itinéraire. Pour conclure, le modèle de Wickens & Prevett (1995) sera présenté afin de définir le lien entre ces deux tâches, en termes de référentiels spatiaux de l'utilisateur.

La tâche de locomotion

La tâche de locomotion consiste à spécifier la position, l'orientation et la vitesse de déplacement du point de vue de l'utilisateur. Pour cela, plusieurs techniques d'interaction et plusieurs métaphores ont été proposées. L'une des principales contributions est celle de Ware (1990). Il a proposé trois métaphores de contrôle du point de vue : *scène-dans-la-main*, *contrôle-de-véhicule* et *yeux-dans-la-main*¹⁰. La métaphore *scène-dans-la-main* consiste à modifier le point de vue sur la scène en manipulant la scène elle-même, dans celle du *contrôle-de-véhicule*, l'utilisateur conduit un véhicule virtuel. Enfin, la métaphore *yeux-dans-la-main*, permet de déplacer directement le point de vue, comme si l'utilisateur le tenait dans la main. Une autre catégorie de métaphores fréquemment employée est celle issue des techniques de locomotion naturelles (tapis roulants, bicyclettes) (Bouguila *et al.*, 2000 ; Noma *et al.*, 2000 ; Lourdeaux, 2001). Ces techniques utilisent des mouvements physiques, comme la marche. Elles sont souvent utilisées pour des applications d'entraînement dans lesquelles l'utilisateur doit pouvoir se déplacer de manière similaire au déplacement réel. Comme il n'existe pas de technique préférentielle pour spécifier un déplacement (Bowman *et al.*, 1998), notre objectif n'est pas d'étudier les différentes techniques d'interaction. Nous nous concentrons sur la modélisation de la tâche de locomotion.

La principale contribution dans ce domaine est celle de Bowman *et al.* (1999) qui propose une formalisation de la tâche de locomotion illustrée par la figure 2.6. Cette formalisation permet d'identifier deux sous-tâches dans la locomotion, le positionnement et l'orientation du point de vue de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Trois techniques permettent de spécifier la position de l'utilisateur : la sélection directe de la cible, la sélection des étapes du déplacement et enfin la spécification continue du trajet. Dans le premier cas, l'utilisateur spécifie uniquement le but du mouvement (le point d'arrivée) et le système se charge de déplacer le

10. Ces métaphores sont connues sous les termes anglo-saxons *scene-in-hand*, *vehicle-control* et *eyeball-in-hand*.

point de vue de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Seul le point d'arrivée est contrôlé. Dans le second cas, l'utilisateur définit un chemin à travers l'espace et le système déplace l'utilisateur le long de ce chemin. Enfin, dans le dernier cas, l'utilisateur doit constamment diriger le mouvement. Mais, ces différentes techniques ne nous apportent que peu d'informations sur la modélisation de la locomotion, puisqu'elles correspondent à différentes techniques de réalisation de la tâche.

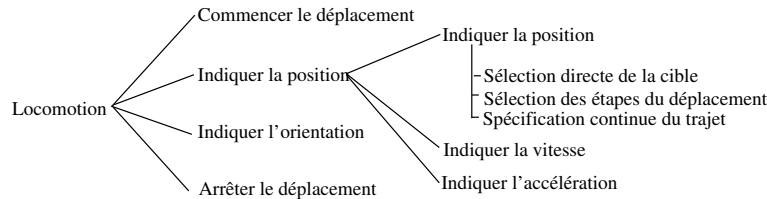


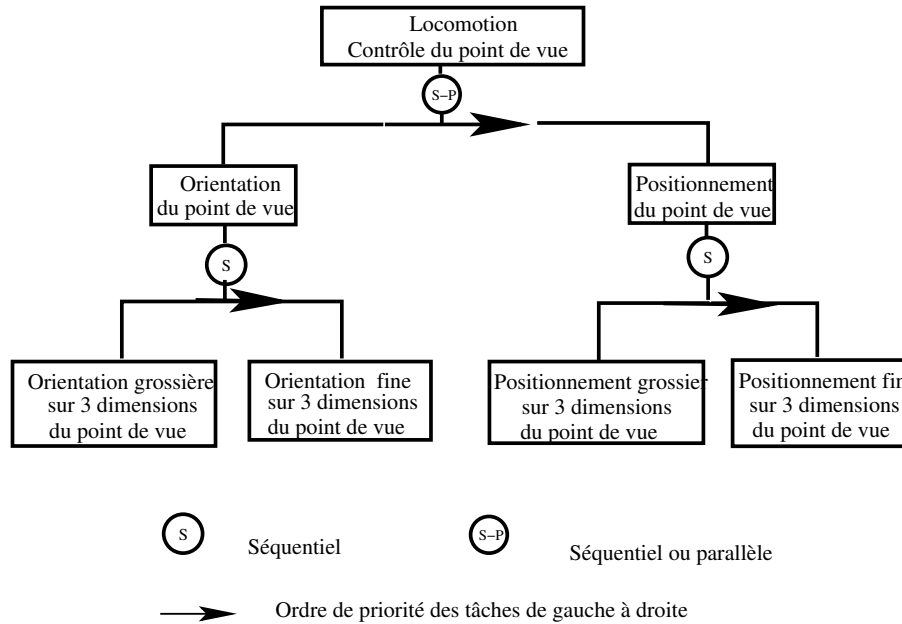
Figure 2.6 – Formalisation de la tâche de locomotion d'après Bowman et al. (1999)

Cette formalisation de Bowman *et al.* (1998) ne considère pas l'orientation du point de vue. En effet, elle a été développée dans le cadre de travaux utilisant des visiocasques et des capteurs de position. Dans ce cadre, l'orientation du point de vue dépend de celle de la tête de l'utilisateur. A notre connaissance, peu de modèles se sont intéressés au contrôle de l'orientation du point de vue.

Dans le cadre des configurations d'interaction que nous étudions, l'utilisateur est positionné face à un écran ou face à un mur immersif. Son point de vue dans l'environnement virtuel n'est pas attaché à la position de sa tête. Le point de vue doit alors être contrôlé par une souris, un joystick, un gant de données (*etc.*) selon les trois dimensions. En nous basant sur cette formalisation de Bowman *et al.* (1998), comme pour la manipulation, nous proposons un modèle hiérarchique de la tâche de locomotion. Ce modèle est illustré sur la figure 2.7.

Dans ce modèle, le positionnement et l'orientation du point de vue ont été séparés en deux sous-tâches : un déplacement grossier suivi d'un déplacement fin. Cette distinction s'inspire de celle proposée par Darken & Sibert (1996) entre les tâches d'exploration ou de recherche basées sur des déplacements grossiers et les tâches de manoeuvre résultant de déplacements fins. Un déplacement grossier permet de débiter le mouvement, tandis qu'un déplacement plus fin permet de l'achever avec précision. Dans la tâche de manipulation, l'orientation et le positionnement de l'objet pouvaient s'effectuer sans ordre de priorité. Par contre, pour la tâche de locomotion, un ordre de priorité a été défini¹¹. Pour être performant, l'utilisateur doit

11. Les modèles hiérarchiques proposés sont des modèles des tâches que doit effectuer l'utilisateur pour réaliser une tâche de manière efficace. Ils ne doivent pas être confondus avec les possibilités techniques. En effet, techniquement, il est possible de se positionner puis d'orienter le point de vue, mais par contre, pour être efficace l'utilisateur doit orienter son point de vue dans la direction de son déplacement.



La tâche d'orientation doit être réalisée avant celle de positionnement. Les sous-tâches de déplacement (positionnement et orientation) sont réalisées de façon séquentielle ou parallèle en fonction du dispositif technique utilisé. S'il permet l'utilisation conjointe des six degrés de liberté, alors les sous-tâches peuvent être réalisées en parallèles, sinon elles sont réalisées séquentiellement.

Figure 2.7 – *Modèle hiérarchique de la tâche de locomotion*

orienter puis positionner son point de vue. En effet, dans de nombreuses applications, pour faciliter le déplacement de l'utilisateur, sa direction suit l'orientation du point de vue. Dans ce modèle, la spécification de la vitesse et de l'accélération ne sont pas représentées, bien qu'elles doivent être contrôlées à chaque changement d'orientation et de position. Ces contrôles de la vitesse et de l'accélération peuvent être considérés comme des sous-tâches particulières.

Ce modèle hiérarchique de la locomotion permet de mettre en exergue les similitudes entre cette tâche et celle de manipulation. En effet, ces deux tâches sont similaires, excepté le fait que dans la tâche de manipulation, l'utilisateur contrôle un objet, alors que dans la tâche de locomotion, il contrôle le point de vue. Ces modèles résultent d'une analyse des tâches et non de celle de l'activité de l'utilisateur. Notre principale interrogation est de savoir si l'utilisateur d'un système de réalité virtuelle a intégré, dans son modèle mental de la situation d'interaction, la dichotomie entre le contrôle du point de vue (propre à la tâche de locomotion) et le contrôle de l'objet (propre à la tâche de manipulation). Le chapitre 5 tentera de répondre à cette interrogation en proposant une représentation de l'utilisateur en environnement virtuel en fonction de ses référentiels spatiaux.

La tâche de recherche d'itinéraire

La recherche d'itinéraire correspond à la composante cognitive de la navigation. Cette tâche se concentre sur la partie stratégique et tactique qui guide le mouvement. Sa réussite dépend de la construction par l'utilisateur d'une *carte cognitive* (Tolman, 1948), c'est-à-dire d'une construction mentale permettant d'acquérir, de stocker et de décoder de l'information sur l'emplacement et les attitudes d'un phénomène dans un environnement spatial (Kitchin, 1994). Pour être construite, une carte cognitive nécessite trois niveaux hiérarchiques de connaissance (Thorndyke & Stasz, 1980 ; Thorndyke & Hayes-Roth, 1982 ; Thorndyke & Goldin, 1983). Le premier niveau est la connaissance des repères visuels de l'environnement, le second, celui des procédures et séquences d'actions pour suivre une route particulière et le troisième, celui de la connaissance experte sur la topologie et la configuration de l'environnement. Au premier niveau de connaissance, l'utilisateur dispose d'informations centrées sur lui-même (ou égocentriques) puisqu'il identifie les points de repères en fonction de sa position. Au dernier niveau de connaissance, l'utilisateur dispose d'informations centrées sur l'environnement (ou exocentriques) puisqu'il est capable de positionner les objets les uns par rapport aux autres.

De nombreux modèles de la navigation, se concentrant essentiellement sur la recherche d'itinéraire, ont été proposés en environnements réels ou virtuels (Downs & Stea, 1977 ; Passini, 1992 ; Goerger *et al.*, 1998 ; Chen & Stanney, 1999 ; Bakker, 2001). Nous nous focalisons sur le modèle de Bakker (2001) illustré sur la figure 2.8. Selon ce modèle, lorsqu'un utilisateur souhaite planifier et exécuter un mouvement, il doit utiliser les connaissances stockées dans sa carte cognitive et connaître sa position courante en utilisant les informations perçues à travers l'interface. Les stimuli disponibles ne sont donc pas naturels mais dépendent de la technologie choisie et utilisée.

La connaissance par l'utilisateur de sa position courante résulte de la combinaison de plusieurs processus de traitement de l'information spatiale :

- l'intégration du chemin qui enregistre l'itinéraire du déplacement à travers l'environnement en se basant sur les retours sensoriels (kinesthésiques, vestibulaires et visuels) ;
- la reconnaissance visuelle qui utilise la carte cognitive de l'utilisateur pour reconnaître visuellement un lieu (cette reconnaissance suppose la familiarité avec l'environnement) ;
- l'anticipation cognitive qui utilise les connaissances de l'utilisateur sur l'environnement et sa planification des actions pour inférer sa position future. Cette anticipation peut faciliter la reconnaissance en activant en mémoire les informations pertinentes.

Des aides peuvent être proposées pour soutenir cette tâche et l'intégration de la position courante de l'utilisateur. Par exemple, Darken et Sibert (Darken & Sibert, 1993 ; 1996) ont montré que l'utilisation de cartes pouvait améliorer les performances lors des tâches de

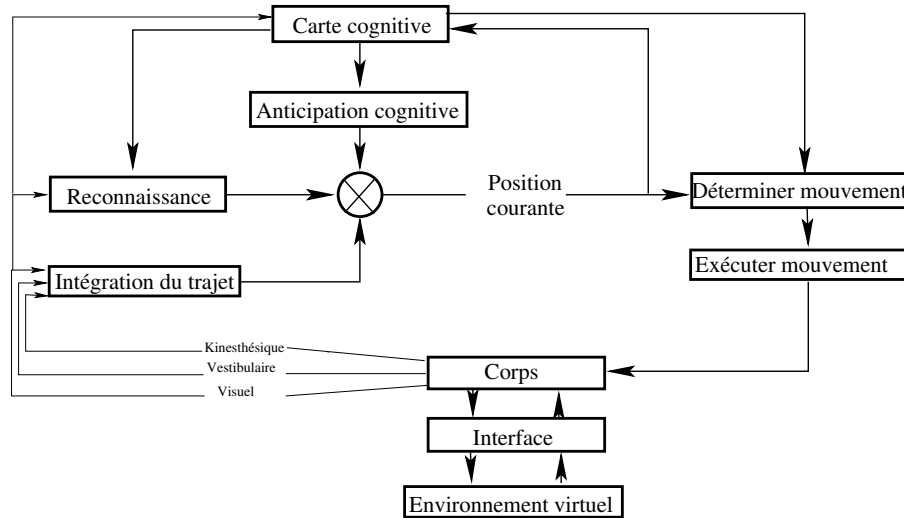


Figure 2.8 – *Modèle de navigation en environnement virtuel proposé par Bakker (2001)*

navigation. La performance peut également être soutenue en intégrant des signes dans l'environnement virtuel ou en indiquant des directions permettant d'identifier des lieux (Passini, 1992 ; Steck & Mallot, 2000). Des auteurs (Darken & Sibert, 1993 ; 1996 ; Charitos, 1997) ont conseillé d'utiliser la théorie de la ville (Lynch, 1960) pour soutenir l'élaboration de cette carte cognitive. Selon cette théorie, cinq éléments permettent à un individu de se repérer dans une ville : les voies, les limites ou bordures, les quartiers, les nœuds et enfin les points de repères.

Contrairement au modèle des tâches de locomotion, ce modèle de recherche d'itinéraire de Bakker (2001) ne permet pas de décrire les diverses tâches et sous-tâches que doit réaliser un utilisateur. Ce modèle est un modèle de l'activité cognitive de l'utilisateur, il est donc impossible à représenter avec une modélisation hiérarchique comme cela a été fait pour les tâches de locomotion et de manipulation. Il est alors difficile de comparer les tâches de locomotion et de recherche d'itinéraire.

Le modèle de Wickens & Prevelt (1995) peut être une aide précieuse pour identifier les différences entre la tâche de locomotion et celle de recherche d'itinéraire.

Le modèle de Wickens & Prevelt (1995)

Le modèle de Wickens & Prevelt (1995), présenté sur la figure 2.9, considère deux tâches de navigation : une tâche de *guidage local*¹² et une tâche de *connaissance de l'environnement*¹³.

12. L'expression *guidage local* est proposée comme traduction du terme anglo-saxon *local guidance*.

13. L'expression *connaissance de l'environnement* est proposée comme traduction du terme anglo-saxon *global awareness*.

Ce modèle est issu du domaine de l'aviation. La tâche de guidage local consiste à piloter l'avion, tandis que celle de connaissance de l'environnement est une tâche de compréhension de l'organisation de l'environnement. La tâche de guidage local peut donc être associée à la locomotion en environnement virtuel et à la gestion des déplacements. La tâche de connaissance de l'environnement, quant à elle, peut être assimilée à la recherche d'itinéraire, à la localisation dans l'environnement.

Ce modèle se divise en trois niveaux (*cf.* figure 2.9). Le niveau le plus bas définit les tâches de navigation. Le second niveau définit les connaissances nécessaires pour permettre la réalisation de ces tâches. Le dernier niveau définit les dispositifs d'affichage requis pour présenter ces connaissances. Pour la tâche de guidage local, les connaissances nécessaires sont des connaissances centrées sur l'utilisateur (ou égocentriques), tandis que pour la tâche de connaissance de l'environnement, l'utilisateur doit posséder des connaissances centrées sur le monde (ou exocentriques) afin de pouvoir se construire une carte cognitive de l'environnement. Les connaissances nécessaires vont influencer le choix des informations devant être affichées. Ainsi pour le guidage, une perspective tridimensionnelle doit être proposée alors que pour la connaissance de l'environnement, une perspective bidimensionnelle générique de type carte doit être préférée. Lorsque les deux tâches sont menées en même temps, des rotations mentales, des zooms, peuvent permettre à l'utilisateur de changer de référentiel.

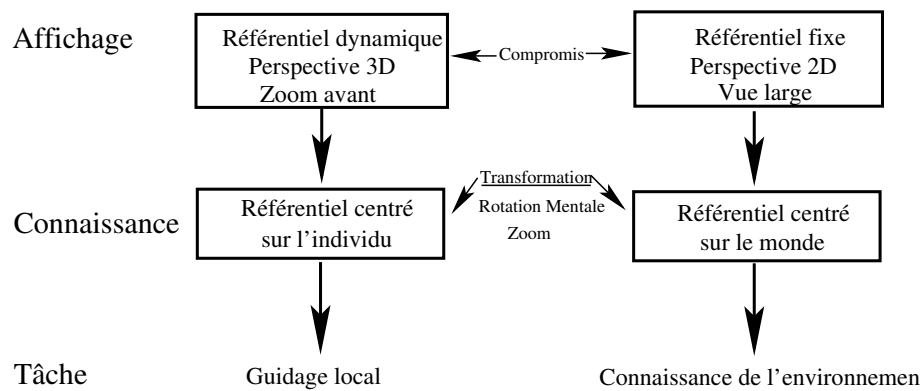


Figure 2.9 – *Modèle de navigation de Wickens & Prevelt (1995)*

Ce modèle met en exergue que la locomotion ne nécessite aucune connaissance globale de l'environnement, mais seulement des connaissances égocentriques alors que la tâche de recherche d'itinéraire nécessite l'élaboration d'une carte cognitive donc d'une connaissance globale. Ce modèle montre également la nécessité d'adapter les affichages en fonction du type de connaissances nécessaires. Ce modèle semble être un excellent support théorique pour les auteurs qui soutiennent la nécessité d'associer une carte à l'affichage de l'environnement virtuel afin de maintenir une bonne orientation spatiale (Darken & Sibert, 1993 ; 1996). Ce modèle

souligne, en autres, les difficultés rencontrées par l'utilisateur pour changer de référentiel. En effet, le passage d'un référentiel égocentrique à un référentiel exocentrique (ou inversement) requiert de la part de l'utilisateur des transformations spatiales (rotation mentale, zoom). Nous reviendrons sur ces problématiques dans le chapitre 5.

Nous venons d'étudier les tâches de manipulation, puis de navigation, plus précisément les tâches de locomotion et de recherche d'itinéraire. Cependant, considérer la manipulation et la navigation comme des tâches indépendantes est arbitraire. En effet, certaines applications en réalité virtuelle peuvent demander à l'utilisateur de manipuler un objet de l'environnement mais également de se déplacer dans celui-ci. Le modèle de Kaur et Sutcliffe (Kaur *et al.*, 1999 ; Sutcliffe & Kaur, 2000), issu de la théorie de l'action de Norman & Draper (1986) permet de relier ces deux tâches.

2.2.3 *Modèle général de l'interaction : navigation et manipulation*

Sutcliffe et Kaur (Kaur *et al.*, 1999 ; Sutcliffe & Kaur, 2000) ont proposé une extension de la théorie de l'action de Norman & Draper (1986) pour décrire le modèle mental de l'utilisateur et ses actions physiques dans un environnement virtuel. Cette théorie propose un modèle de l'interaction en réalité virtuelle composé de trois cycles : *le cycle de réalisation d'une tâche précise sur un objet*; *le cycle de navigation* et *le cycle d'interaction avec le système*. Uniquement les deux premiers cycles, qui sont à la base des tâches de navigation et de manipulation, seront détaillés (*cf.* figure 2.10), le troisième cycle décrivant les interactions avec les agents présents dans l'environnement virtuel ne fait pas partie de notre problématique.

Selon ce modèle, la première étape est la formation d'un but et d'une intention (*cf.* figure 2.10).

Si l'objet nécessaire à l'interaction n'est pas directement visible, alors l'utilisateur doit le chercher dans l'environnement. L'utilisateur entre alors dans *le cycle de navigation*. Il doit trouver son chemin dans l'environnement, décider de la direction, naviguer, interpréter les changements dans l'environnement pour se repérer et se construire une carte cognitive de cet environnement en mémorisant les informations intéressantes.

Lorsque l'utilisateur a localisé l'objet, parce qu'il était directement visible ou après avoir naviguer dans l'environnement, l'utilisateur entre dans *le cycle de la tâche*. Il s'approche de l'objet et s'oriente dans une position correcte pour réaliser sa tâche. Il peut ensuite manipuler l'objet. Ces deux étapes demandent à l'utilisateur de spécifier et de planifier la suite d'actions qu'il doit effectuer. Enfin, l'utilisateur doit percevoir le retour sensoriel l'informant sur l'état du système puis interpréter la nature du changement. L'utilisateur poursuit sa tâche jusqu'à ce qu'il soit satisfait du résultat.

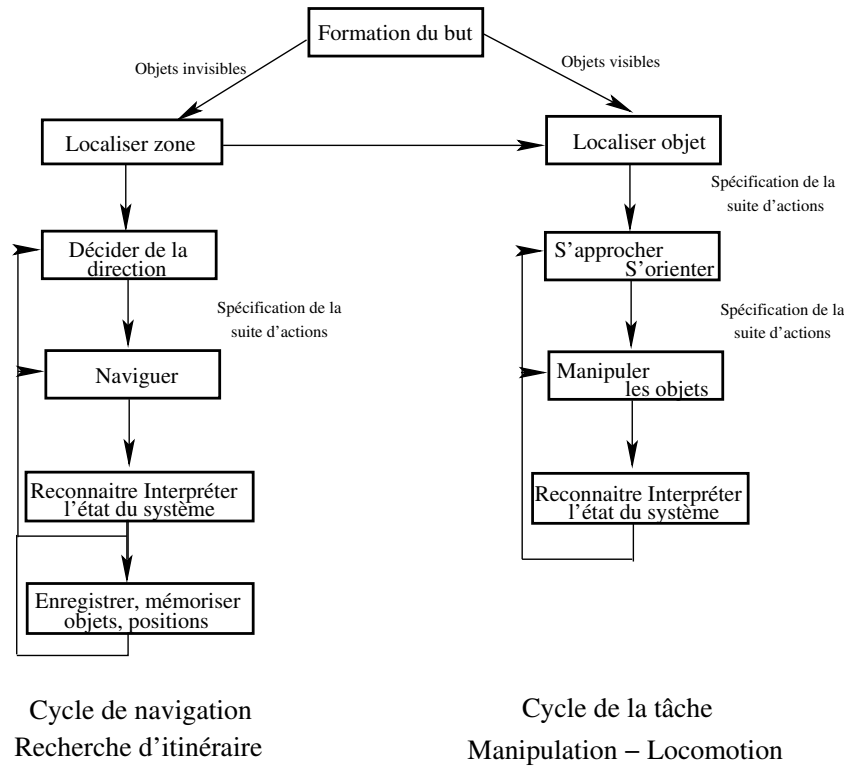


Figure 2.10 – Les cycles d'action et de navigation d'après Sutcliffe & Kaur (2000)

Ces deux cycles de l'interaction permettent de décrire l'interdépendance des tâches de navigation et de manipulation. L'interaction en réalité virtuelle peut demander à un utilisateur de naviguer dans l'environnement virtuel afin de repérer un objet puis de manipuler cet objet. Ces deux cycles permettent également d'illustrer les deux composantes de la navigation. En effet le premier cycle de réalisation de la tâche peut être assimilé à une tâche de locomotion. L'utilisateur doit essentiellement se diriger dans l'environnement, tandis que le cycle de navigation, à proprement parler, implique la construction d'une carte cognitive de l'environnement virtuel. Il peut donc être assimilé à la recherche d'itinéraire. Selon cette modélisation, la locomotion et la manipulation sont réalisables dans un cycle de base alors que la recherche d'itinéraire semble être un processus n'intervenant pas dans le même cycle. Cette modélisation montre la pertinence de la théorie de l'action pour modéliser la réalisation d'une tâche en réalité virtuelle.

2.2.4 Synthèse

Nous venons d'étudier deux tâches d'interaction en réalité virtuelle : la manipulation et la navigation. La manipulation est la tâche de positionnement et d'orientation d'un objet dans

un environnement tridimensionnel. Le référentiel de cette tâche est l'objet. La navigation peut se diviser en deux sous-tâches, l'une motrice, la locomotion, l'autre cognitive, la recherche d'itinéraire. La première est le processus moteur de déplacement et d'orientation du point de vue de l'utilisateur. Le référentiel de cette tâche est donc le point de vue. La seconde est le processus cognitif complexe impliquant des fonctions cognitives de haut niveau, telles que la reconnaissance de lieu, l'anticipation cognitive, l'intégration de chemin (Bakker, 2001) *etc.*

Ce travail de recherche se consacre à l'étude des tâches de locomotion et de manipulation. En effet, il est primordial de comprendre ces tâches d'interaction pour pouvoir étudier ultérieurement les processus de plus haut niveau tels que la recherche d'itinéraire. Nous avons insisté sur cette tâche de recherche d'itinéraire, car la majorité des études expérimentales servant de support à l'expérimentation présentée dans le chapitre 4, se focalisent sur cette tâche.

Concernant la locomotion et la manipulation, deux modèles hiérarchiques de ces tâches ont été proposés dans ce chapitre (*cf.* la figure 2.5, page 35 pour la manipulation et la figure 2.7, page 38 pour la locomotion). Certaines applications pouvant demander aux utilisateurs de se déplacer dans l'environnement virtuel mais également de manipuler un objet, l'une des difficultés pour l'utilisateur va être d'interpréter correctement les informations qui lui seront fournies en fonction du référentiel utilisé pour réaliser la tâche. Ces modèles hiérarchiques présentés dans ce chapitre apparaissent cependant comme restrictifs car ils ne permettent pas d'appréhender les modèles mentaux des situations d'interaction construits par les utilisateurs. Nous tenterons de répondre à cette critique dans le chapitre 5.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la tâche que doit réaliser l'utilisateur, le chapitre suivant est consacré à l'utilisateur qui doit réaliser cette tâche.

CHAPITRE 3

Modèle de l'Utilisateur

Dans le chapitre précédent, la tâche, était au centre de nos propos. Dans ce chapitre et le suivant, nous nous focalisons sur l'utilisateur. Dans ce chapitre, plus précisément, nous nous intéressons aux modèles de l'utilisateur. Dans le chapitre suivant, nous nous concentrerons sur les études expérimentales liant performances d'interaction et caractéristiques de l'utilisateur. Ces deux approches complémentaires (modélisation et résultats expérimentaux) serviront de fondement à l'élaboration de nos hypothèses sur les caractéristiques de l'utilisateur influençant la performance d'interaction en réalité virtuelle.

L'objectif de ce chapitre dédié à l'utilisateur, est d'étudier les modèles de l'utilisateur utilisés dans le cadre de l'ingénierie cognitive¹. Ces modèles tentent de proposer des théories explicatives ou prédictives uniques qui recouvrent les différents aspects de l'utilisateur afin de soutenir la conception et l'optimisation des interfaces (Coutaz, 1991). Ils utilisent pour cela des concepts issus de la psychologie cognitive. Cependant, en psychologie cognitive, il existe une multitude de théories, chacune est dédiée à l'étude d'une classe de phénomènes précis: théorie de la résolution de problèmes, théorie de la représentation mentale, théorie de l'apprentissage, *etc.* Chaque théorie sensibilise le concepteur à une classe particulière de

1. La classification des modèles selon les disciplines, ingénierie ou psychologie, résulte uniquement des domaines d'application de ces modèles. Les modèles issus de l'ingénierie cognitive trouvent leurs fondements dans la psychologie cognitive ou du moins dans l'étude des facteurs humains.

concepts et de processus cognitifs, mais leur multiplicité rend difficile leur application dans une démarche de conception (Coutaz, 1991). Il en résulte que les modèles de l'ingénierie cognitive ont parfois tendance à tomber dans l'excès inverse en simplifiant ou détournant certains concepts.

Afin de conserver d'une part un cadre de réflexion unique tentant de recouvrir les différents aspects d'un utilisateur et d'autre part la richesse des théories de la psychologie cognitive, nous étudions dans un premier temps les modèles issus de l'ingénierie cognitive et dans un second temps leur description en nous référant aux théories classiques de la psychologie cognitive.

L'analyse de ces deux catégories de modèles permettra de proposer un modèle de l'utilisateur qui servira à identifier les différentes étapes du traitement de l'information pouvant influencer la performance lors de l'interaction homme-machine, et plus particulièrement lors de l'interaction en réalité virtuelle.

Avant de présenter ces différents modèles, le paradigme du traitement de l'information qui sert de fondement à l'ensemble des modèles est introduit.

3.1 *Le traitement de l'information*

L'activité cognitive humaine peut se modéliser sous la forme d'un système de traitement de l'information (Newell & Simon, 1972) se composant de récepteurs, d'effecteurs, d'un processeur qui traite l'information et d'une mémoire qui la stocke (*cf.* figure 3.1).

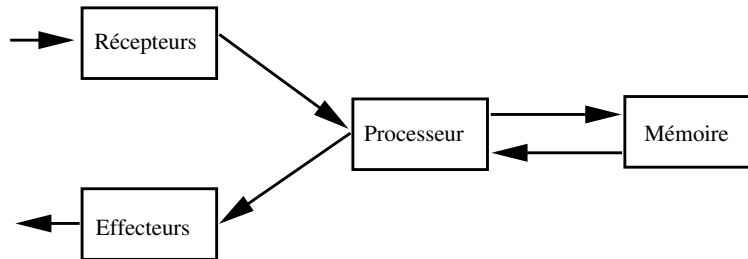


Figure 3.1 – Une représentation schématique d'un système de traitement de l'information

Cette modélisation, qualifiée de *cognitivisme computationnel*, propose une analogie entre le fonctionnement du cerveau et celui d'un ordinateur. Le cognitivisme prône le fonctionnement computationnel du cerveau et des mécanismes biologiques en général. Il considère que l'homme, tel un ordinateur, manipule des symboles élémentaires (Houde *et al.*, 1998 ; Varela, 1989). Cette conception peut se résumer de la façon suivante *penser c'est traiter de l'information, traiter de l'information c'est calculer, c'est-à-dire manipuler des symboles, selon des règles*. Notre travail, ainsi que l'ensemble des modèles décrits dans ce chapitre, se place dans le paradigme

du cognitivisme computationnel.

Nous pouvons néanmoins noter l'existence d'un second paradigme des sciences cognitives : *le paradigme connexionniste*. Il trouve ses racines dans les travaux de McCulloch & Pitts (1943) et de Hebb (1949). Ce courant envisage la cognition comme le résultat de l'interaction globale des parties élémentaires d'un système en se référant notamment aux processus d'auto-organisation. Le système cognitif et son fonctionnement sont abordés à travers l'interaction de différents neurones correspondant à des automates à seuil. Pris isolément, ces éléments ne disposent d'aucune compétence particulière ; par contre, lorsqu'ils sont inter-connectés pour former un réseau plus ou moins complexe, des *compétences cognitives* apparaissent.

Nous débutons l'étude des modèles cognitivistes de l'utilisateur en introduisant les différents modèles utilisés en ingénierie cognitive.

3.2 Modèles de l'utilisateur utilisés en ingénierie cognitive

En ingénierie cognitive, deux types de modélisation peuvent être identifiés selon leur objectif : les modèles permettant de prédire la performance d'un utilisateur et les modèles permettant de proposer un cadre formel d'interprétation des performances. Ces deux types de modélisation seront successivement décrits dans cette section.

3.2.1 Modèles prédictifs de la performance

Le principal modèle prédictif de la performance est le *Modèle du Processeur Humain* de Card *et al.* (1983). Pour compléter nos propos, les architectures cognitives permettant de prédire les performances des utilisateurs seront présentées en conclusion.

Le Modèle du Processeur Humain

Le *Modèle du Processeur Humain* conçoit le traitement de l'information en trois systèmes interdépendants : sensoriel, moteur et cognitif (*cf.* figure 3.2). Chacun de ces sous-systèmes serait composé d'un processeur et de plusieurs mémoires. Les processeurs peuvent se caractériser par leur cycle de base τ , qui inclut le cycle d'accès à leur mémoire locale (*cf.* figure 3.2).

Les mémoires, quant à elles, peuvent se caractériser par leur capacité μ , c'est-à-dire le nombre d'éléments d'information pouvant être mémorisés simultanément ; leur persistance δ , durée au bout de laquelle la probabilité de retrouver un élément d'information en mémoire est

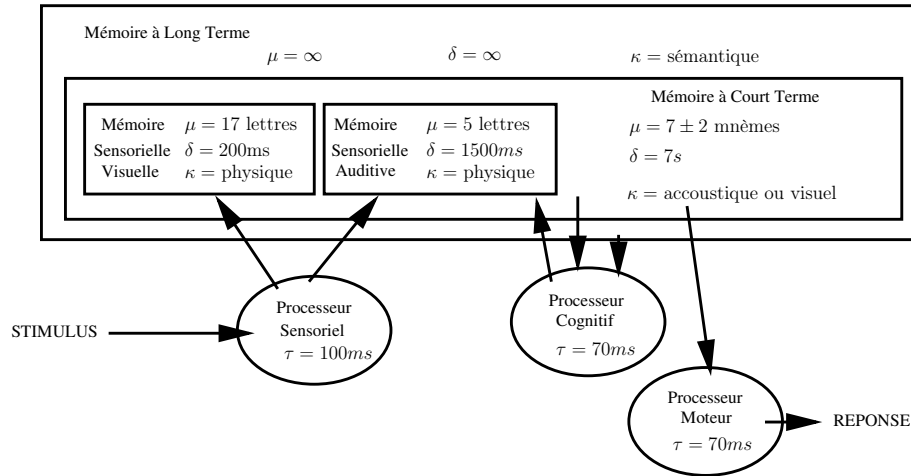


Figure 3.2 – Le Modèle du Processeur Humain d'après Card et al. (1983)

inférieure à 50 %²; le type d'information mémorisée (physique, symbolique, etc.), κ .

Pour compléter la description de ce modèle, les systèmes sensoriel, moteur et cognitif sont successivement détaillés.

Le système sensoriel est conçu comme un ensemble de sous-systèmes traitant des stimuli issus des différents récepteurs sensoriels : le sous-système visuel, le sous-système auditif etc. Selon ce modèle, chaque sous-système comprendrait une mémoire sensorielle et un mécanisme de traitement intégré. Ces mémoires sensorielles transmettraient des informations à la mémoire à court terme. Si celle-ci est saturée, les informations ne peuvent plus être transmises et se dégradent. Les caractéristiques de ces mémoires sensorielles et du processeur associé sont indiquées sur la figure 3.2.

Le système moteur est responsable des mouvements. Un mouvement est constitué d'une suite de micro-mouvements discrets, chacun s'accomplissant en 70 millisecondes³ en moyenne (cf. figure 3.2).

Le système cognitif est défini comme étant composé d'une mémoire à court terme (ou mémoire de travail) et d'une mémoire à long terme. La mémoire à court terme serait la partie active de la mémoire à long terme. En effet, cette dernière contiendrait l'ensemble des connaissances permanentes organisées en un réseau de mnèmes. Un mnème peut se définir comme une unité cognitive symbolique pouvant être associée à d'autres unités. Par exemple,

2. La probabilité de retrouver une information au cours du temps semble suivre une fonction décroissante linéaire (Card *et al.*, 1983). Lorsque cette probabilité est inférieure à 50 %, le rappel d'informations peut résulter du hasard.

3. Cette estimation est issue d'une compilation des travaux de Chapanis *et al.* (1949), de Fitts & Posner (1967), de Fox & Stansfield (1964) et de Kinkead (1975).

le sigle *DAO* constitue un mnème pour un infographiste, mais forme 3 mnèmes pour toute personne ne connaissant pas le *Dessin Assisté par Ordinateur*. Ce réseau de mnèmes serait activé en mémoire à court terme en fonction de la tâche à réaliser. Les caractéristiques des mémoires à court et à long terme sont indiquées sur la figure 3.2. Le dernier composant de ce sous-système est le processeur cognitif. Il fonctionnerait selon un cycle à deux phases : *reconnaissance-exécution* dont la durée est estimée à environ 70 millisecondes⁴. Pendant ce cycle de *reconnaissance-exécution*, le processeur rechercherait en mémoire à long terme, les actions associées aux mnèmes activés dans la mémoire à court terme puis les exécuterait.

Ce Modèle du Processeur Humain trouve ses bases dans des études expérimentales. Il permet notamment de définir un certain nombre de paramètres et de lois, semblant constituer des approximations réalistes formelles et utiles à la prise de décision pour la conception d'interfaces-homme-machine. De nombreuses recherches (Lerch *et al.*, 1989 ; Nielsen *et al.*, 1993 ; Lohse, 1991 ; Kieras & Meyer, 1997) ont permis d'affiner ces paramètres. Pour aider les concepteurs d'interfaces à utiliser ce modèle, la famille des méthodes de conception *GOMS* de Card *et al.* (1983) décrite sommairement dans le chapitre 2 (section 2.1), a été développée. Par exemple, la méthode *Keystroke Level Model (KLM)* se base notamment sur les estimations numériques du Modèle du Processeur Humain pour prédire le temps nécessaire à la réalisation d'une tâche d'interaction, telle que saisir une lettre au clavier (estimé à 0,2 seconde) ou déplacer un curseur (estimé à 1,35 secondes).

La principale critique pouvant être faite à ce Modèle du Processeur Humain est qu'il modélise uniquement les aspects perceptifs et moteurs et qu'il ne considère pas les processus cognitifs de résolution de problèmes, de gestion des erreurs *etc.* Les modèles développés ultérieurement tenteront de répondre à cette critique.

Dans la lignée de ce modèle, d'autres types de modélisation, tels que les architectures cognitives computationnelles, ont tenté de prédire les performances des utilisateurs lors de l'interaction homme-machine.

Les architectures cognitives computationnelles

Les architectures cognitives computationnelles ont pour objectif de représenter le traitement de l'information grâce à un programme informatique basé essentiellement sur des règles de production et de sélection similaires à celles utilisées dans des systèmes experts. Elles sont fréquemment utilisées pour effectuer des simulations informatiques des performances humaines. Ces architectures n'ont pas été développées exclusivement pour l'interaction homme-machine, mais ont néanmoins été utilisées dans ce domaine (Carroll, 2003). Les architectures

4. Cette estimation est issue d'une compilation des travaux de Sternberg (1975), de Michon (1978), de Landauer (1962), de Hick (1952), de Welford (1973) et de Blumenthal (1977).

le plus fréquemment utilisées sont par exemple *ACT-RPM (Atomic Component Thought with Rational Analysis and Perceptual/Motor Enhancements)* (Byrne & Anderson, 1998 ; Byrne, 2001), *Soar* (Newell, 1990) et *EPIC (Executive Process-Interactive Control)* (Kieras & Meyer, 1997). Cette dernière architecture a, par exemple, permis d'étudier les performances des utilisateurs en fonction des stratégies de parcours des menus dans une interface (Hornof & Kieras, 1997).

Ces architectures cognitives, au même titre que le Modèle du Processeur Humain, tentent de prédire le temps nécessaire à l'accomplissement d'une tâche lors de l'interaction homme-machine afin de guider les choix de conception pour optimiser la performance.

Une autre catégorie de modélisation est celle tentant de décrire les étapes du traitement de l'information. Ces modèles ont pour vocation de servir de cadre formel à l'étude des différents composants de la performance humaine. Ils peuvent, par exemple, permettre d'étudier les limitations de la mémoire humaine et les conséquences sur l'interaction homme-machine. Ces modèles font l'objet de la sous-section suivante.

3.2.2 Modèles descriptifs du traitement de l'information

Différents modèles descriptifs du traitement de l'information ont été proposés. L'objectif de ce type de modélisation est de fournir un cadre formel pour analyser les différentes étapes de traitement entrant en jeu lors de l'interaction avec un système informatique (Wickens, 1992). De nombreux modèles existent (Barnard, 1985 ; McCoy & Funk, 1991 ; Wickens & Hollands, 2000). Barnard, par exemple, a proposé le modèle *ICS, Interacting Cognitive Subsystems* qui a notamment été utilisé pour l'étude des situations de multi-modalités en interaction homme-machine (Coutaz *et al.*, 1993 ; Salber, 1995), tandis que McCoy & Funk, *op. cit.*, ont défini un modèle descriptif permettant de comprendre les erreurs humaines dans le contrôle aérien.

Nous nous concentrons sur le modèle de Wickens & Hollands (2000), représenté sur la figure 3.3. Ce modèle est basé sur le paradigme du traitement de l'information, ce qui implique que l'information est traitée de façon séquentielle et que chaque étape de traitement est coûteuse en ressources attentionnelles et en temps.

Selon ce modèle, l'information est perçue au niveau des registres sensoriels et des premières étapes perceptives. Ces informations sont sélectionnées puis transmises à la mémoire de travail. Cette dernière la traiterait en utilisant, notamment, les informations présentes en mémoire à long terme et sélectionnerait la réponse motrice appropriée. Elle permettrait également le transfert de l'information dans la mémoire à long terme pour une rétention de plus longue durée. Cette mémoire de travail peut être assimilée à une interface entre les perceptions, la mémoire à long terme et la production de la réponse motrice. L'ensemble de ces étapes demanderait des ressources attentionnelles. Or selon de nombreux modèles classiques

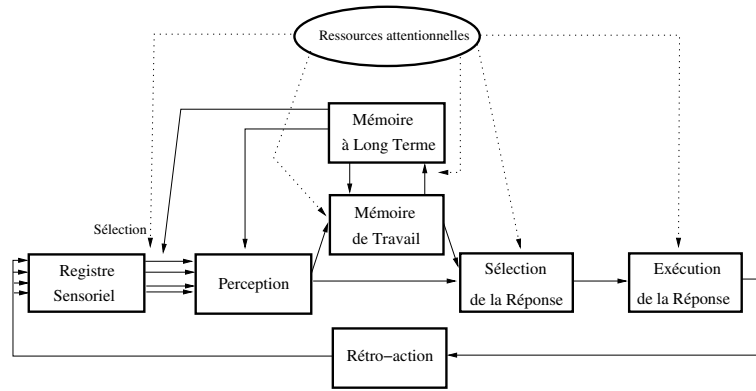


Figure 3.3 – *Modèle descriptif du traitement de l'information d'après Wickens & Hollands (2000)*

en psychologie cognitive (Baddeley, 1986 ; Norman & Shallice, 1980 ; Couillet *et al.*, 2002 ; Camus, 1996), l'allocation de ces ressources serait sous la responsabilité de la mémoire de travail. Dans notre travail, cette position sera conservée en étudiant conjointement la mémoire de travail et l'allocation des ressources attentionnelles. Le modèle de Wickens & Hollands peut donc être simplifié. Le nouveau modèle est représenté sur la figure 3.4.

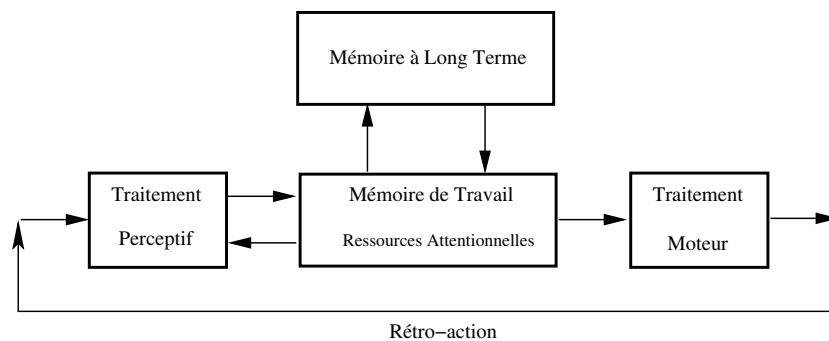


Figure 3.4 – *Proposition de modèle simplifié pour étudier l'interaction homme-machine*

Ce nouveau modèle se base sur quatre étapes principales : les traitements perceptifs et moteurs, la mémoire de travail et la mémoire à long terme. Cette simplification peut paraître excessive car elle ne considère pas les processus de raisonnement, de résolution de problèmes, *etc.* Cependant, ces processus sont souvent considérés dans l'analyse de la tâche (*cf.* chapitre 2), et notamment grâce à la théorie de l'action de Norman & Draper (1986). En outre, ce modèle simplifié est cohérent avec celui de Card *et al.* (1983) introduit précédemment.

L'un des objectifs de notre travail de recherche est d'identifier quelles sont les caractéristiques de l'utilisateur influençant sa performance d'interaction en réalité virtuelle. Ce modèle

peut servir de fondement à cette réflexion. Nous avons fait le choix de nous focaliser sur les traitements sensoriels et moteurs ainsi que sur la mémoire de travail. La mémoire à long terme ne sera pas considérée dans cette étude. Une des raisons est que son évaluation, notamment dans ses composantes procédurales et visuo-spatiales, n'est pas aisée. De plus, cette mémoire à long terme peut être reliée à l'expérience du sujet dans la tâche, dans l'utilisation de la technologie *etc.*

Dans la section suivante, nous définissons ces trois étapes : le traitement perceptif, la mémoire de travail et le traitement moteur. L'ensemble des théories concernant ces trois composantes ne pouvant être présenté dans le cadre de ce travail, nous nous sommes limités aux théories principales et à celles pour lesquelles des évaluations psychométriques ont été proposées (qui seront utilisées dans le chapitre 6).

3.3 *Les étapes du traitement de l'information*

3.3.1 *Le traitement perceptif*

Le premier contact avec l'environnement est assuré par les organes et les récepteurs sensoriels. Ce premier contact permet la sensation. Il est intrinsèquement lié aux caractéristiques physiologiques des récepteurs sensoriels. Cette problématique échappe à l'objet de ce travail. Nous nous concentrons sur la façon dont l'information est interprétée après avoir été perçues par les récepteurs sensoriels. L'une des hypothèses prédominantes est que cette information serait stockée temporairement dans une mémoire sensorielle. Les mémoires sensorielles visuelle ou *mémoire iconique* (Sperling, 1960 ; Coltheart, 1980) et auditive ou *mémoire échoïque* (Moray *et al.*, 1965 ; Darwin *et al.*, 1972) ont été les plus étudiées. Par exemple, Sperling (1960) a démontré l'existence de cette mémoire visuelle grâce à une technique de rappel partiel. Cette technique consiste en la présentation très brève (entre 50 et 300 millisecondes) d'une grille de trois lignes et quatre colonnes, chaque case contenant une lettre. Le sujet doit, soit rappeler la totalité des lettres projetées (rappel complet), soit rappeler uniquement les lettres présentes sur une des trois lignes de la grille (rappel partiel). Un signal sonore après la présentation de la grille indique la ligne à rappeler. En condition de rappel complet, en moyenne, quatre ou cinq lettres sur douze sont rappelées, alors qu'en condition de rappel partiel les sujets rappellent en moyenne trois lettres sur quatre. Les sujets, ne pouvant pas anticiper la ligne qu'ils auront à rappeler, maintiendraient donc en mémoire environ trois lettres pour chaque ligne, soit environ neuf lettres. Cette mesure observée en rappel partiel semble être une estimation de la quantité d'information disponible dans cette mémoire sensorielle visuelle. A partir de ces résultats, Sperling (1960) a fait l'hypothèse que l'information sensorielle était transformée en une représentation mnésique de nature visuelle (appelée icône), d'où la proposition du terme

mémoire iconique par Neisser (1967).

Pour Sperling (1960), la mémoire sensorielle contiendrait seulement les propriétés physiques du stimulus. Cependant, Coltheart (1980) a proposé que la mémoire iconique pourrait également mettre en jeu les propriétés sémantiques de l'item perçu. Des études complémentaires (Di Lollo & Dixon, 1988 ; Irwin & Yeomans, 1986) ont proposé que la mémoire iconique maintiendrait l'information visuelle, puis qu'elle identifierait, catégoriserait et reconnaîtrait l'item perçu. Les études récentes semblent donc accrédi-ter l'hypothèse d'un traitement sémantique dès l'étape des registres sensoriels. Il résulte de ces travaux que les registres sensoriels sont souvent considérés comme étant la première étape du traitement de l'information.

Après avoir été traitée par ces registres sensoriels, l'information est sélectionnée et transmise à la mémoire de travail, que nous étudions dans la sous-section suivante.

3.3.2 *La mémoire de travail*

La mémoire de travail est définie comme *un système de maintien temporaire et de manipulation de l'information, nécessaire pour réaliser des activités cognitives complexes, telles que la compréhension, l'apprentissage, le raisonnement* (Baddeley, 1986). Cette notion fait référence à un système dynamique intégrant et transformant l'information. Elle se démarque de la notion de mémoire à court terme, qui correspond à un système de stockage passif.

Le modèle de la mémoire de travail défini par Baddeley (1986), illustré sur la figure 3.5, est un système tripartite comprenant un superviseur (l'administrateur central) et deux sous-systèmes : l'un spécialisé dans le traitement du matériel linguistique (la boucle phonologique), l'autre dans le traitement de l'information visuo-spatiale (le calepin visuo-spatial). Baddeley a proposé l'existence de ces deux sous-systèmes, sans écarter la possibilité qu'il en existe plus. Les arguments en faveur de cette vue à composantes multiples proviennent essentiellement d'observations de doubles dissociations⁵ (Logie, 1995) et de recherches en neuro-imagerie qui suggèrent l'implication de différentes régions du cerveau pour des tâches différentes en mémoire de travail (Smith & Jonides, 1997). Dans les paragraphes suivants, les propriétés de ces trois composants seront détaillées. Une attention particulière sera portée aux propriétés du calepin visuo-spatial qui prend une place particulière lors de l'interaction en réalité virtuelle (*cf.* chapitre 4).

5. Pour conclure en terme de double dissociation, il faut démontrer qu'un symptôme A apparaît lors de la lésion d'une structure S1 mais non lors de celle de S2 et que le symptôme B apparaît lors de la lésion de la structure S2 mais pas de S1.

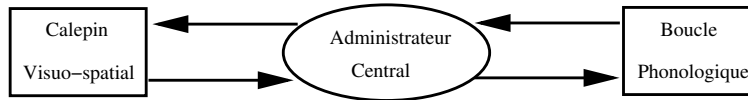


Figure 3.5 – *Le modèle de mémoire de travail (Baddeley, 1986)*

L'administrateur central

Ce système amodal aurait pour fonction de contrôler l'allocation des ressources attentionnelles, de planifier l'activité, de transférer l'information en mémoire à long terme, de gérer la mise en oeuvre et la coordination des deux sous-systèmes (la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial). Il serait mobilisé pour effectuer des tâches cognitives de haut niveau : raisonnement, compréhension du langage, calcul *etc.* (Baddeley, 1986). Ce système serait responsable de l'ensemble des fonctions de contrôle de l'activité.

L'une des fonctions principales de cet administrateur central est l'allocation des ressources attentionnelles. En effet, chaque tâche (selon son degré de pratique ou selon le contexte d'exécution) ne consomme pas la même quantité de ressources. A chaque instant, la demande cumulée de ressources attentionnelles de toutes les tâches excède la quantité disponible. Dès lors, une régulation devient indispensable pour éviter une diminution généralisée d'efficacité de la performance. Ce régulateur prend divers noms selon les modèles (administrateur central, processeur central, superviseur attentionnel) mais sa fonction est la même : déterminer les priorités de traitement garantissant à une tâche un niveau satisfaisant de ressources attentionnelles (Couillet *et al.*, 2002 ; Camus, 1996). Certains auteurs ont proposé l'existence d'un réservoir unique de ressources attentionnelles (Kahneman, 1973), tandis que d'autres (Allport *et al.*, 1972 ; Wickens, 1980 ; 1984), ont suggéré l'existence de réservoirs multiples spécialisés dans des traitements particuliers (vision, audition *etc.*) et indépendants pouvant fonctionner sans concurrence ni interférence.

Les formulations récentes de la mémoire de travail (Baddeley, 1986 ; 1992 ; 2000) assimilent le fonctionnement de l'administrateur central à celui du système attentionnel de supervision défini dans le modèle de Norman & Shallice (1980). L'idée fondamentale de ce modèle est que nous serions capables de réaliser un grand nombre d'actions quotidiennes sans y prêter attention, c'est-à-dire de manière automatique, alors qu'un contrôle attentionnel volontaire s'avérerait nécessaire lorsqu'une composante de planification ou d'inhibition d'un comportement dominant est requise (Norman & Shallice, 1980). Norman & Shallice (1980) ont donc proposé un modèle composé de deux entités principales : un mécanisme de résolution de conflits et un système attentionnel de supervision. Ces deux entités agiraient sur les schémas d'actions. Ceux-ci sont définis comme étant des structures de connaissances génériques et hiérarchisées

contrôlant des séquences d'actions sur-apprises, des routines. Selon ce modèle, le gestionnaire de conflits sélectionnerait les schémas d'action les plus pertinents et contrôlerait l'action jusqu'à sa réalisation. Ce processus de déclenchement et de sélection serait rapide, automatique et suivrait des règles et des lignes de conduite claires. Ce processus concernerait uniquement les situations familières. Le système attentionnel de supervision, quant à lui, interviendrait dans des situations où les procédures de routine sont insuffisantes. Ce système serait mis en oeuvre pour réaliser des tâches dangereuses ou difficiles, pour des situations impliquant un processus de planification, de prise de décision, de correction d'erreurs, de réaction à la nouveauté, ainsi que pour des situations exigeant de contrecarrer une réponse habituelle forte. Cette seconde voie serait plus lente, plus contrôlée que celle du gestionnaire de conflits, par contre, elle serait plus flexible et plus coûteuse en ressources.

La boucle phonologique

La boucle phonologique, représentée sur la figure 3.6, maintiendrait les informations verbales (auditives ou visuelles). Elle serait responsable de la mise en oeuvre des processus articulatoires (impliqués dans la compréhension et la production du langage). Cette boucle soutiendrait l'auto-répétition mentale qui permettrait de maintenir l'information en mémoire de travail ou de la transférer en mémoire à long terme. La boucle phonologique est définie comme étant composée d'un stock phonologique à court terme et d'une boucle articulatoire qui permet de maintenir l'information dans ce stock. Le fonctionnement de cette boucle serait basé sur un codage phonologique des items verbaux (Conrad, 1967 ; Baddeley, 1966). Ces items verbaux présentés en modalité auditive doivent donc subir une analyse phonologique, tandis que pour ceux présentés en modalité visuelle, un codage phonologique est nécessaire. Par abus de langage, le terme mémoire verbale peut être employé pour désigner l'activité résultante de la boucle phonologique.

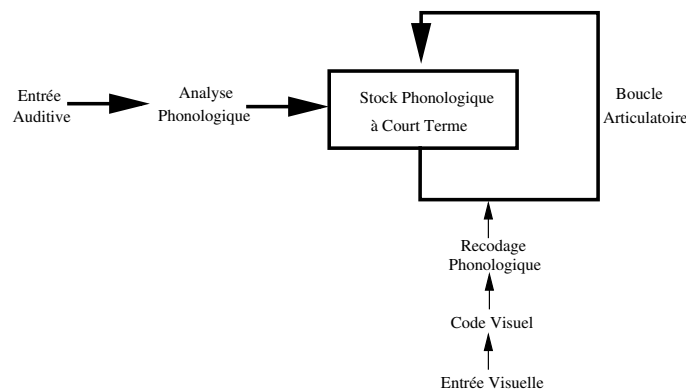


Figure 3.6 – *Le système de la boucle phonologique*

Le calepin visuo-spatial

Le dernier composant du modèle de la mémoire de travail est le calepin visuo-spatial. Il serait impliqué dans le stockage temporaire de l'information visuelle et spatiale (information non verbale). Il gèrerait et coordonnerait les processus impliqués dans des tâches d'imagerie mentale⁶ (par exemple les tâches de rotation mentale de Shepard & Metzler (1971)) et de recherche visuo-spatiales (les tâches de parcours mental de Kosslyn *et al.* (1978)). Ce composant permettrait d'accomplir les tâches de cognition spatiale comme, par exemple, trouver son chemin pour aller d'un point à l'autre de l'espace (Lemaire, 1999). Par abus de langage, le terme mémoire visuo-spatiale peut être employé pour désigner l'activité résultante de ce calepin.

De nombreuses données expérimentales, et neuropsychologiques, ont conduit des auteurs à proposer l'éclatement du calepin visuo-spatial en deux registres distincts : un registre spatial qui traiterait l'information spatiale ainsi que les relations entre les objets et un registre visuel qui traiterait les couleurs et les formes (Baddeley, 1992 ; Logie, 1986 ; Logie & Marchetti, 1991 ; Logie & Pearson, 1997 ; Smith *et al.*, 1995 ; Tresch *et al.*, 1993 ; Hecker & Mapperson, 1997). Ceci expliquerait que la rétention temporaire de l'information visuelle est perturbée par un stimulus visuel non pertinent, mais pas par une tâche concurrente spatiale (telle qu'une tâche de mouvement du bras) (Logie, 1986 ; Logie & Marchetti, 1991). Par contre, la rétention d'un matériel spatial n'est pas perturbée par la présentation concurrente d'un matériel visuel. Des études ont également montré que le calepin visuo-spatial, plus et précisément le registre spatial, serait impliqué dans la planification des mouvements (Smyth & Pendleton, 1990 ; Logie, 1995 ; Salway & Logie, 1995).

Nous reviendrons sur le traitement de l'information visuo-spatiale dans le chapitre 4, section 4.1 en introduisant les capacités spatiales, la théorie des images mentales et les études en réalité virtuelle montrant de fortes corrélations entre la performance en réalité virtuelle et le traitement de l'information spatiale.

Si le modèle de Baddeley (1986) est parfois contesté, notamment par les modèles fondés sur la notion d'activation (Cowan, 1988), il constitue néanmoins une référence dans ce domaine. Selon nous, son principal intérêt est qu'il considère les processus spatiaux, contrairement aux modèles antérieurs de la mémoire, (Waugh & Norman, 1965 ; Atkinson & Shiffrin, 1968). Pour conclure, nous noterons qu'une révision de ce modèle incorporant un *buffer épisodique* a été proposé par Baddeley (2000). Ce buffer aurait une capacité limitée, serait contrôlé par l'administrateur central et serait capable d'intégrer de l'information provenant de diverses

6. Nous reviendrons sur cette théorie des images mentales dans le chapitre 4.

sources. Il servirait d'interface entre les sous-systèmes (boucle phonologique, calepin visuo-spatial) et la mémoire à long terme.

Cette mémoire de travail permet notamment de sélectionner la réponse motrice adaptée à la situation. Nous étudions ce dernier point dans le paragraphe suivant.

3.3.3 *Le traitement moteur*

La sélection de la réponse motrice et son exécution sont les deux principales étapes du traitement moteur. Elles résultent des activités cognitives précédentes (perception, traitement mnésique). Nous ne développerons pas davantage la sélection qui fait, à notre sens, référence essentiellement à la prise de décision et non pas à la mise en oeuvre directe de la réponse motrice. Nous nous concentrons sur l'exécution motrice, également définie comme la programmation motrice du geste. Dans sa définition la plus stricte, un programme moteur est constitué d'une série d'instructions destinées à sélectionner les groupes musculaires, à régler l'intensité et la temporalité de leur contraction et relaxation (Keele, 1968 ; Schmidt, 1982). Le programme moteur est donc une structure centrale, organisée avant le déclenchement de la réponse motrice (Keele, 1968 ; Schmidt, 1982). Ces théories classiques du contrôle moteur (Keele, 1968 ; Schmidt, 1982) sont très généralistes et s'appliquent à l'ensemble des mouvements. Pour compléter notre réflexion, nous nous intéressons aux études portant plus spécifiquement sur le contrôle des mouvements manuels. En effet, dans le cadre de l'interaction homme-machine, la réponse motrice est généralement manuelle (ou du moins est-ce le cas, dans le cadre de notre étude). La tâche la plus fréquemment étudiée est la tâche de pointage de cible.

Les premières investigations (Woodworth, 1899 ; Brown & Slater-Hammel, 1949) ont montré que le temps nécessaire pour déplacer la main d'un point de départ vers une cible, dépend de la relation vitesse / précision. En effet, plus l'atteinte de la cible sera rapide, moins le pointé sur la cible sera précis. Fitts et ses collaborateurs (Fitts, 1954 ; Fitts & Peterson, 1964) ont poursuivi ces travaux en étudiant la relation entre le temps, la précision et la distance. Ils ont ainsi montré que quand l'amplitude du mouvement et la taille de la cible sont manipulées, leurs effets relatifs peuvent se résumer par l'équation suivante :

$$T = a + b \log_2 \frac{2A}{W}$$

T est la durée moyenne nécessaire pour exécuter la tâche ; A est l'amplitude de mouvement ;

W la largeur de la cible ; a et b sont des constantes déterminées expérimentalement.

Cette équation montre que pour une taille de cible fixée, le temps pour atteindre cette cible augmente de façon logarithmique avec l'amplitude du mouvement. Des études ultérieures ont permis de montrer les nombreuses applications possibles de cette loi. Ainsi, elle reste valable pour prédire le temps de frappe sur un clavier (Card *et al.*, 1983), pour sélectionner des cibles

mouvantes (Jagacinski *et al.*, 1980) ou pour des tâches demandant des rotations et des flexions du poignet (Crossman & Goodeve, 1983). Elle a servi de base à de très nombreuses études en interaction homme-machine pour comparer des périphériques (Card *et al.*, 1978 ; Epps, 1986), des techniques d'interaction (MacKenzie *et al.*, 1991 ; Gillan *et al.*, 1990) ou pour améliorer les performances de l'utilisateur (Balakrishnan, 2004). Bien que cette loi soit reconnue comme robuste et générique, plusieurs études ont suggéré que ce modèle n'était pas optimal. Des modèles alternatifs ont alors été proposés (voir (Plamondon & Alimi, 1997) pour une revue). Parmi eux, le modèle de Mackenzie (1992) a été adopté par la communauté de l'interaction homme-machine, il est défini par l'équation :

$$T = a + b \log_2 \frac{A}{W + 1}$$

T est la durée moyenne nécessaire pour exécuter la tâche; A est l'amplitude de mouvement;
 W la largeur de la cible; a et b sont des constantes déterminées expérimentalement.

Aux vues de l'ensemble de ces résultats, la loi de Fitts (Fitts, 1954) et ses dérivés (Mackenzie, 1992), semblent refléter une propriété fondamentale de la performance motrice humaine et être pertinentes pour modéliser l'exécution de la réponse motrice manuelle.

3.4 Synthèse

Dans la première partie de ce chapitre, les principaux modèles utilisés en ingénierie cognitive pour modéliser l'utilisateur d'un système informatique ont été présentés. Partant de ces modèles, un modèle simplifié a ensuite été proposé (*cf.* figure 3.4, page 51). Afin de le compléter, les différentes étapes du traitement de l'information ont été étudiées pour obtenir un nouveau modèle qui sera utilisé pour la suite de ces travaux (*cf.* figure 3.7). Ce modèle divise le traitement de l'information en quatre étapes principales : le traitement perceptif, le traitement par la mémoire de travail puis par la mémoire à long terme et enfin le traitement moteur. Ce modèle est très proche de celui de Card *et al.* (1983) proposé au début de ce chapitre. Les étapes proposées sont similaires, le concept de mémoire à court terme du modèle de Card *et al.* (1983) est remplacé par un modèle nous semblant plus complet, celui de la mémoire de travail. Par contre, ces étapes de traitement de l'information ne sont pas caractérisées par des approximations numériques.

La principale critique pouvant être faite à ce modèle est sa simplicité. En effet, il ne considère pas les processus de haut niveau de planification de l'activité, de raisonnement, de prise de décision. Cependant cette analyse de l'utilisateur est menée de façon conjointe avec celle de la tâche (*cf.* chapitre 2) dans laquelle ces processus de haut niveau sont pris en compte. Cette modélisation de l'utilisateur se cantonne donc aux étapes de traitement de

l'information de bas niveau pouvant influencer la performance d'interaction. De plus, chacune de ces étapes peut être évaluée grâce à des mesures psychométriques. Ce modèle peut donc servir de support à l'identification des caractéristiques de l'utilisateur pouvant influencer la performance d'interaction (*cf.* chapitre 6). Enfin, ce modèle est suffisamment générique pour pouvoir être utilisé en ingénierie cognitive.

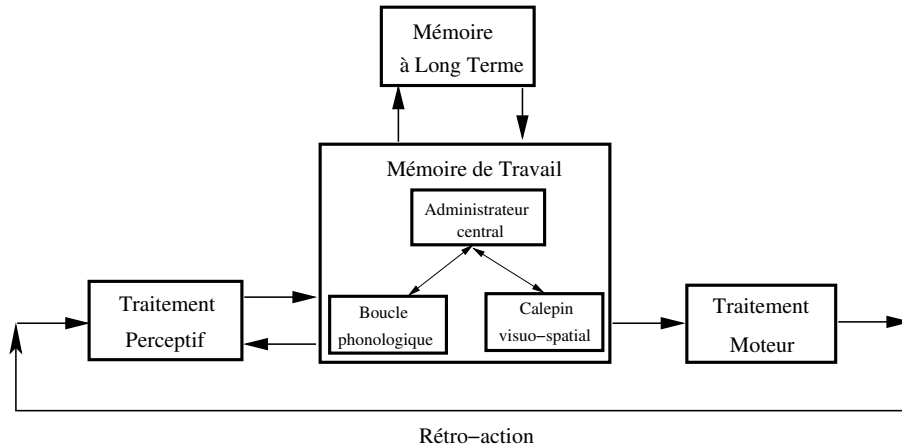


Figure 3.7 – *Modèle simplifié permettant d'étudier l'interaction homme-machine*

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'utilisateur grâce aux modèles existants, dans le suivant, nous l'étudions à travers les travaux expérimentaux reliant sa performance en réalité virtuelle et ses caractéristiques.

CHAPITRE 4

Caractéristiques de l'Utilisateur et Performances

Dans le chapitre précédent, différents modèles de l'utilisateur d'un système informatique basé sur le paradigme cognitiviste du traitement de l'information ont été étudiés. Ces modèles ont été développés pour identifier différentes étapes de traitement de l'information et pour proposer des modèles génériques prédictifs de la performance. Cependant, ils ont rarement été utilisés pour étudier les différences de performances entre les utilisateurs potentiels. Pourtant de nombreuses études ont tenté d'identifier, d'expliquer ou de pallier aux différences entre les utilisateurs d'un système informatique (Egan & Gomez, 1985 ; Egan, 1988) afin de pouvoir adapter les interfaces aux différents utilisateurs potentiels. Ces dernières se basent essentiellement sur l'étude des habitudes, des préférences, des capacités et des *styles cognitifs* des utilisateurs. A titre d'exemple, nous pouvons citer les travaux de Egan (1988) et de Nielsen *et al.* (1993) sur l'influence du niveau d'expérience de l'utilisateur sur la performance d'interaction.

Dans ce chapitre, notre objectif est d'identifier les caractéristiques de l'utilisateur qui vont influencer la performance en réalité virtuelle, en nous inspirant notamment des travaux issus du domaine de l'interaction homme-machine. En réalité virtuelle, trois grandes catégories de travaux s'intéressant à ces caractéristiques de l'utilisateur peuvent être identifiées : ceux reliant

ces caractéristiques au sentiment de présence (Barfield & Weghorst, 1993 ; Witmer & Singer, 1998 ; Sas & O'Hare, 2001), ceux les reliant au mal des simulateurs (Kolasinski, 1995 ; LaViola, 2000), ou enfin ceux les reliant aux performances de navigation ou de manipulation dans un environnement virtuel. La problématique de cette recherche portant sur ces tâches d'interaction, uniquement ce dernier point sera abordé. Une large revue de la littérature nous a permis d'identifier quatre caractéristiques principales de l'utilisateur influençant la performance dans les tâches de réalité virtuelle : les capacités spatiales, les styles cognitifs, plus particulièrement la dépendance-indépendance à l'égard du champ, l'expérience de l'utilisateur (dans la tâche à réaliser, dans le domaine de l'application, dans l'utilisation de la technologie *etc.*) et son sexe. D'autres caractéristiques, par exemple l'attention visuelle (Arthur *et al.*, 1995) ont été étudiées de façon relativement anecdotique dans le cadre des jeux vidéo ou de l'interaction homme-machine, uniquement les études représentatives ont été retenues.

Chacune de ces caractéristiques de l'utilisateur (capacités spatiales, styles cognitifs, expérience, sexe) sera présentée succinctement. Ainsi, pour les capacités spatiales, la théorie factorielle des aptitudes spatiales puis, celle de l'imagerie mentale également reliée aux capacités spatiales seront présentées. Pour la dépendance-indépendance à l'égard du champ, nous débuterons en définissant les styles cognitifs avant de nous focaliser plus particulièrement sur ce style particulier. Concernant l'expérience de l'utilisateur, notre réflexion sera basée sur le modèle de Rasmussen (1986). Enfin, pour la question des différences hommes / femmes, nous nous limiterons aux travaux les reliant aux performances de navigation en environnement réel.

A la suite des présentations de ces différentes caractéristiques, les études montrant leur impact sur la performance en réalité virtuelle seront détaillées. Pour conclure notre réflexion, nous formulerons des hypothèses concernant les relations qu'entretiennent ces différentes caractéristiques avec le modèle du traitement de l'information présenté précédemment et celles que nous pouvons tirer concernant leurs implications dans la performance en réalité virtuelle.

4.1 *Les capacités spatiales*

Les capacités spatiales font généralement référence à la capacité à produire, représenter, transformer et rappeler des informations spatiales (Linn & Petersen, 1985). Deux perspectives théoriques et méthodologiques peuvent être considérées : la première se base sur l'approche factorielle des aptitudes spatiales, la seconde dans l'approche du traitement de l'information et de l'imagerie mentale. Ces deux perspectives seront introduites avant de présenter les travaux reliant les capacités spatiales aux performances dans des tâches d'interaction en réalité virtuelle.

4.1.1 Approche factorielle

L'approche factorielle des aptitudes spatiales joue un rôle central dans les théories factorielles de l'intelligence (Spearman, 1923 ; Thurstone, 1938 ; Guilford, 1967 ; Carroll, 1993). Cette approche consiste à trouver, à l'aide d'outils statistiques, le point commun, le facteur commun entre plusieurs épreuves, plusieurs performances observées afin d'établir une carte des aptitudes humaines (Marendaz, 1990).

Dans le cadre des premières recherches sur les capacités spatiales menées notamment par Thurstone (1938), un facteur spatial unique a été identifié (distinct du facteur verbal et du facteur numérique). Des recherches ultérieures ont permis de mettre en avant l'existence de plusieurs facteurs spatiaux (Guilford & Lacey, 1947). Cependant, il semble difficile de préciser le nombre de facteurs spatiaux qu'il est possible d'isoler pour de multiples raisons théoriques et méthodologiques. En effet, cette approche factorielle est fortement dépendante de la nature, de la complexité et du type d'épreuves utilisées. Par exemple, l'émergence du facteur *orientation spatiale* dépend de la présence ou non dans la batterie de tests d'indicateurs de cette dimension (Juhel, 1990).

Malgré ces difficultés, un consensus a été proposé pour admettre une dissociation entre deux facteurs principaux (Carpenter & Just, 1986 ; Lohman, 1979 ; 1988 ; McGee, 1979 ; Hegarty & Waller, 2004) : l'orientation et la visualisation spatiale.

Le facteur *orientation spatiale* mesure la capacité à se représenter l'apparence d'un objet selon les différentes perspectives de l'utilisateur. Ce facteur est notamment mesuré grâce à des tests mettant en jeu l'aptitude d'un sujet à se représenter comment un point de vue peut apparaître sous une autre perspective. Le principal test pour mesurer cette composante est le *test d'orientation spatiale* de Guilford & Zimmerman (1989), le sujet doit comparer deux images représentant chacune la vue d'un observateur placé dans un bateau et identifier les mouvements du bateau intervenant entre les deux images (Juhel, 1990).

Le facteur *visualisation spatiale*, quant à lui, mesure la capacité à imaginer le mouvement des objets et des formes spatiales. Les marqueurs typiques de cette dimension sont notamment les tests de rotation mentale (Vandenberg & Kuse, 1978 ; Ekstrom *et al.*, 1976), les tests demandant de recomposer des formes bidimensionnelles (comme par exemple le *Minnesota Paper Form Board* (Likert & Quasha, 1954)) ou des formes tridimensionnelles (par exemple le sous-test *Block Design* issu de l'échelle d'intelligence *WAIS* (Wechsler, 1981)) ou enfin des tests demandant d'imaginer des formes pliées ou dépliées (par exemple le sous-test spatial du *Differential Aptitude Test* (Bennett *et al.*, 1974)). Certains auteurs distinguent un troisième facteur nommé *relations spatiales* qui définit la vitesse de rotation mentale (Lohman, 1979 ; Pellegrino & Kail, 1982). Des facteurs primaires, ou secondaires, associés au traitement de

l'information spatiale ont également été définis (Lohman, 1979 ; 1988 ; McGee, 1979) notamment *la vitesse de structuration* (rapidité avec laquelle une information visuelle incomplète est organisée grâce à la signification associée à sa représentation à long terme) ou *la souplesse de structuration* (identification de figures emboîtées dans des formes complexes) (Juhel, 1990 ; Marendaz, 1990). Dans notre étude, uniquement les deux facteurs principaux, l'orientation et la visualisation spatiale, seront utilisés pour étudier l'impact des capacités spatiales sur la performance d'interaction en réalité virtuelle. Cette dissociation en deux facteurs ayant été critiquée et mise en cause dans des travaux récents (Hegarty & Waller, 2004) postulant l'existence d'un facteur commun, nous utiliserons un indicateur global de capacités spatiales intégrant à la fois orientation et visualisation spatiale.

Avant de conclure, un dernier point doit être souligné. En effet, de nombreuses recherches sur les capacités spatiales ont montré des différences de performances entre les sexes. Ces différences ne sont pas identiques en fonction des tâches étudiées. Ainsi, des différences importantes en faveur des hommes ont été identifiées pour les mesures de rotation mentale et d'orientation spatiale¹ (Linn & Petersen, 1985 ; Voyer *et al.*, 1995) tandis que des différences fines ont été observées dans des tâches de perception et de recomposition de formes² (Linn & Petersen, 1985). Pour le facteur orientation spatiale, les hommes sont plus performants, alors que pour le facteur visualisation spatiale, la supériorité des hommes dépend du test utilisé (en rotation mentale, les hommes sont plus performants, par contre en recomposition de formes, les femmes ont des performances quasi similaires à celles des hommes). Les femmes semblent être plus performantes dans les tâches de mémoire spatiale (Stumpf & Eliot, 1995). Nous reviendrons sur l'impact du sexe sur les capacités spatiales et la performance en réalité virtuelle dans la section 4.4.

Nous retiendrons notamment que les tests de visualisation et d'orientation spatiale impliquent différents types de transformations (Hegarty & Waller, 2004). Ces transformations exigent notamment du sujet de mettre à jour des relations entre trois référentiels spatiaux différents : le référentiel de l'objet, le référentiel égocentrique (centré sur l'individu) et le référentiel de l'environnement (Zacks *et al.*, 2000). Le facteur d'orientation spatiale peut être interprété comme la capacité à effectuer des transformations spatiales égocentriques, le référentiel de l'objet ne changeant pas. En revanche, le facteur de visualisation spatiale peut se définir comme la capacité à effectuer une transformation spatiale sur le référentiel de l'objet, le référentiel égocentrique restant fixe. Dans les deux cas, les transformations sont effectuées dans

1. Les normes du *test de rotation mentale* de Vandenberg & Kuse (1978) et de sa version française (Albaret & Aubert, 1996) montrent des différences significatives de performances en faveur des hommes, de même pour le *test d'orientation spatiale* de Guilford & Zimmerman (1989); ces deux tests sont utilisés pour mesurer les performances de rotation mentale et d'orientation spatiale.

2. Le manuel du Minnesota Paper Form Board (Likert & Quasha, 1954) conclue en faveur d'une égalité de performances entre les hommes et les femmes, ce test est utilisé pour évaluer la visualisation spatiale.

le respect du référentiel de l'environnement. Dans le chapitre 2, nous avons insisté sur l'importance des référentiels spatiaux dans l'interaction en réalité virtuelle. D'après ces définitions théoriques, nous pouvons faire l'hypothèse d'une dépendance forte entre les capacités spatiales et la performance en réalité virtuelle puisque dans les deux cas, le sujet doit manipuler ou transformer des informations visuo-spatiales en fonction soit du référentiel de l'objet, soit du référentiel de l'individu. Avant d'étudier explicitement les relations entre les performances en réalité virtuelle et les capacités spatiales, la seconde perspective d'étude des capacités spatiales est introduite : l'imagerie mentale.

4.1.2 *Approche cognitive : images mentales*

Les capacités spatiales ont également été étudiées dans le cadre des théories du traitement de l'information, plus spécifiquement dans celui des images mentales visuelles. Ces images mentales peuvent être définies comme des représentations mentales qui impliquent à la fois des informations spatiales et visuelles (Kosslyn, 1980 ; 1994 ; Finke, 1989). Elles peuvent être considérées comme des représentations présentes en mémoire à long terme et manipulées ou transformées en mémoire de travail (Kosslyn, 1980). Cette définition des images mentales est issue des théoriciens (Kosslyn, 1994 ; Finke, 1989) soutenant que l'information contenue dans ces images est stockée dans un code analogique, c'est-à-dire dans une représentation imagée très ressemblante à l'objet physique. Pour ces auteurs, l'imagerie mentale entretient une relation étroite avec la perception.

Pour étudier cette structure des images mentales, des indicateurs chronométriques ont été utilisés. Par exemple, Kosslyn *et al.* (1978) ont montré que le temps nécessaire à l'examen d'une image (mentale ou réelle) est proportionnel à l'éloignement des éléments qui la composent. Ainsi, si un sujet doit balayer mentalement une carte entre un point de départ et une cible, le temps de balayage dépendra de la distance entre ces deux points. De même, Shepard & Metzler (1971) ont montré que le temps nécessaire pour effectuer la rotation mentale d'un objet dépend de l'angle de cette rotation. De plus, en neuro-imagerie, Ganis *et al.* (2004) a montré que les aires cérébrales activées étaient identiques que les sujets perçoivent un objet ou l'imaginent mentalement. L'ensemble de ces données est en faveur d'un codage analogique des images mentales puisqu'il suggère que les processus de transformation qui s'appliquent aux images mentales sont similaires à ceux qui s'appliquent aux objets réels perçus ou manipulés.

Une seconde approche émet l'hypothèse que les images mentales sont stockées dans un code propositionnel, c'est-à-dire sous forme d'une représentation abstraite descriptive qui s'apparente au langage des mots ; le stockage n'est ni visuel, ni spatial, et ne ressemble pas au stimulus d'origine. Pour les tenants de cette approche, l'imagerie mentale entretiendrait une relation étroite avec le langage et non avec la perception (Pylyshyn, 1984).

Ces travaux ont notamment permis de mettre en exergue des différences inter-individuelles dans le traitement de l'information spatiale (Juhel, 1990 ; Denis, 1990). Ces différences peuvent provenir de la vitesse et de la précision du traitement de l'information ou de la qualité des représentations spatiales (en termes de précision, de capacité, d'organisation) (Juhel, 1990). Pour les étudier de façon objective, différents tests psychométriques ont été utilisés. Dans ces tests, le sujet est soumis à une tâche, en temps limité. Le chercheur présume que la résolution de cette tâche fait appel à l'imagerie. Le sujet doit, par exemple, prédire le résultat d'une transformation appliquée à une structure géométrique en deux ou trois dimensions (rotation, dépliage, recomposition de formes *etc.*). Cette configuration peut être présentée directement au sujet ou bien lui être décrite verbalement, le sujet devant alors la visualiser pour opérer mentalement les transformations indiquées. Les épreuves traditionnellement utilisées sont les mêmes que celles utilisées pour étudier les aptitudes spatiales (*cf.* sous-section 4.1.1) par exemple le *Minnesota Paper Form Board* (Likert & Quasha, 1954) et le *Mental Rotation Test* de Vandenberg & Kuse (1978).

Les deux perspectives (approche factorielle et cognitive) classiquement définies dans le cadre des capacités spatiales viennent d'être rappelées. Ces deux positions ne sont pas antagonistes d'un point de vue théorique. Leurs différences résident essentiellement dans leur utilisation. La théorie des aptitudes spatiales cherche à identifier des profils d'individus tandis que celle des images mentales a pour objectif de comprendre les processus de traitement de l'information. De façon générale, en interaction homme-machine (et en réalité virtuelle), la première approche est la plus fréquemment utilisée afin d'identifier les profils des utilisateurs performants. Les études relatives à cette approche sont présentées dans la sous-section 4.1.3.

Cependant, les résultats obtenus dans ces études peuvent également être interprétés en termes de différences inter-individuelles en imagerie mentale. Afin de rester cohérent avec le cadre cognitiviste du modèle de l'utilisateur présenté dans le chapitre 3, nous considérerons la mémoire de travail comme le siège des processus d'imagerie mentale (Kosslyn, 1980). Ces capacités ou aptitudes spatiales pouvant être considérées comme résultantes de l'activité de la mémoire de travail et plus particulièrement de l'administrateur central et du calepin visuo-spatial (Hegarty *et al.*, 2000 ; Shah & Miyake, 1996 ; Miyake *et al.*, 2001).

Nous poursuivons notre réflexion en étudiant l'implication de ces capacités spatiales dans la performance en réalité virtuelle. Les capacités spatiales étant sous la dépendance de la mémoire de travail, les études concernant la mémoire spatiale sous la dépendance du calepin visuo-spatial seront également présentées. Enfin certains travaux ayant étudié simultanément les capacités spatiales et la mémoire verbale, nous présenterons également quelques résultats concernant cette dernière.

4.1.3 Capacités spatiales et performance en réalité virtuelle

Dans un premier temps, les principales études issues du domaine de l'interaction homme-machine et de celui des environnements virtuels sémantiques seront présentées, dans un second temps les études reliant les capacités spatiales aux performances en réalité virtuelle seront introduites.

Le rôle des capacités spatiales dans la navigation dans de grandes structures de fichiers, dans des bases de données ou dans des hypermédias³ a été étudié depuis de nombreuses années. Le lecteur trouvera des revues de cette problématique dans Egan (1988) ou plus récemment Chen & Rada (1996) et Chen & Yu (2000). Quelques-unes de ces études sont présentées à titre d'exemple.

Ainsi, Vicente *et al.* (1987) ont montré que les capacités spatiales étaient corrélées au temps nécessaire pour localiser une cible dans un système hiérarchique de fichiers. En effet, les utilisateurs ayant de faibles capacités spatiales ont tendance à se perdre dans des structures hiérarchiques. Des résultats similaires ont montré des corrélations fortes entre les capacités en rotation mentale et le temps de complétion d'une tâche de recherche d'informations dans un hypermédia (Dahlbäck *et al.*, 1996). Ces résultats peuvent être affinés par celui de Benyon & Murray (1993). Ces auteurs ont montré que les utilisateurs ayant de bonnes capacités spatiales étaient plus performants pour effectuer des requêtes dans une base de données en utilisant un langage de commande, tandis que les utilisateurs ayant de faibles capacités spatiales étaient plus performants avec un système de requêtes à base de menus.

Ces études ont fait l'objet d'extensions directes en réalité virtuelle dans le cadre des recherches sur les environnements virtuels sémantiques. Les environnements virtuels sémantiques sont des espaces d'informations représentés sous forme de graphes et construits en trois dimensions en fonction de la sémantique de l'information. Cette représentation permet de proposer un double codage sémantique et spatial de l'information afin de faciliter sa localisation et sa compréhension. Ces environnements virtuels sont particuliers car l'organisation spatiale est porteuse de sens. Dans ce cadre, Chen (2000) a étudié l'impact des mémoires associative (permettant l'association de différents concepts, d'images et de mots, de plusieurs mots, *etc.*) et visuelle sur la recherche d'informations. Les résultats ont indiqué que plus les sujets avaient de bonne performance en mémoire associative, plus un nombre importantes d'informations pertinentes était localisé. Les deux variables mémoire associative et nombre d'informations localisées sont donc *corrélées positivement*. Par contre, ce nombre d'information localisées n'était pas corrélé aux performances en mémoire visuelle. Une seconde expérience de cette étude ne

3. Un hypermédia se base sur un procédé semblable à celui de l'hypertexte, mais les objets manipulés sont du texte, des images, des vidéos, des sons *etc.* Un hypertexte est un texte contenant des liens permettant un accès direct vers d'autres parties du texte ou d'autres pages.

montre aucune corrélation véritablement significative entre les facteurs cognitifs (visualisation spatiale, mémoire associative) et la performance de recherche d'informations. Cependant, il est difficile de conclure car ces études ont été effectuées sur des effectifs de sujets très réduits (dix sujets).

Les travaux de Westerman & Cribbin (2000) et de Westerman *et al.* (2005) ont permis de les compléter et de les affiner. En effet, Westerman *et al.* (2005) ont proposé une expérimentation similaire mais sur un échantillon de quatre vingt quatre participants. Ils ont montré que les utilisateurs faibles en mémoire spatiale sont plus rapides et plus efficaces dans leur recherche d'informations que les utilisateurs performants en mémoire spatiale. Ces résultats indiquent donc une *corrélation négative*. Par contre, ils ne montrent aucun effet de la mémoire associative. De plus, Westerman *et al.* (2005) ont proposé deux types de représentation de l'environnement sémantique : une représentation bidimensionnelle et une représentation tridimensionnelle. Les utilisateurs faibles en mémoire spatiale sont meilleurs avec une représentation tridimensionnelle tandis que les utilisateurs bons en mémoire spatiale sont meilleurs avec une représentation bidimensionnelle. Ces résultats sont relativement surprenants car ils montrent que les utilisateurs efficaces en mémoire spatiale sont en difficulté avec une représentation tridimensionnelle de l'information. Ces résultats sont spécifiques à un type d'environnement très particulier où l'organisation spatiale de l'information a un sens. Il est donc difficile d'extrapoler ces résultats à tout environnement virtuel. Ils montrent néanmoins que l'utilisation d'un environnement tridimensionnelle engendre des différences de performances importantes en fonction des capacités spatiales et mnésiques des utilisateurs.

Dans la seconde partie de cette section, nous nous focaliserons uniquement sur l'impact des capacités spatiales sur la performance en réalité virtuelle. L'un des principaux auteurs de ce domaine est David Waller. En effet, il a réalisé différents travaux étudiant l'impact des différences inter-individuelles sur la performance de navigation dans un environnement virtuel, notamment sur l'acquisition des connaissances spatiales relatives à cet environnement et sur le transfert de ces connaissances en environnement réel (Waller *et al.*, 2001 ; Waller, 1999 ; Waller *et al.*, 1998). Nous nous intéressons plus particulièrement à l'étude publiée en 2000⁴. Cet auteur a demandé à des étudiants d'effectuer une tâche de navigation dans un labyrinthe virtuel. Le labyrinthe était visualisé sur un écran d'ordinateur et le sujet utilisait un joystick pour se déplacer dans l'environnement virtuel. Waller (2000) a mesuré les performances de locomotion dans ce labyrinthe virtuel par le temps de complétion de la tâche. Il a également estimé l'acquisition de connaissances spatiales sur ce labyrinthe en demandant au sujet d'estimer des distances entre des points particuliers de l'environnement et de dessiner une carte de cet environnement à la fin de la tâche de navigation. Du point de vue des caractéristiques

4. Les résultats des autres études (Waller *et al.*, 2001 ; Waller, 1999 ; Waller *et al.*, 1998) sont cohérents avec ceux présentés dans Waller (2000)

de l'utilisateur, Waller (2000) s'est intéressé au sexe et aux capacités spatiales (plus particulièrement à l'orientation et à la visualisation spatiale) des utilisateurs mais également aux capacités verbales, à l'expérience des ordinateurs, et à l'acquisition de connaissances en monde réel. Ces résultats ont mis en exergue des corrélations positives entre les capacités spatiales, les performances de locomotion et la performance d'acquisition de connaissances dans un environnement virtuel. Ce résultat permet de conclure que la composante cognitive de la navigation (l'acquisition de connaissances spatiales) ainsi que la composante motrice (la locomotion) sont corrélées aux capacités spatiales. Nous reviendrons sur les résultats concernant l'impact du sexe des utilisateurs sur les performances dans la section 4.4.

Cette étude de Waller (2000) est l'une des rares à s'intéresser explicitement à l'implication des capacités spatiales sur la performance de locomotion en réalité virtuelle. En effet, les études se sont surtout concentrées sur l'acquisition de connaissances en environnement virtuel. Par exemple, Moffat *et al.* (1998) ont étudié comment des sujets trouvaient leur chemin dans un labyrinthe virtuel. Ce labyrinthe était visualisé sur un ordinateur classique et les sujets se déplaçaient avec les touches du clavier. La performance de navigation a été estimée grâce au temps de complétion de la tâche et au nombre d'erreurs dans le déplacement. Du point de vue des caractéristiques des utilisateurs, Moffat *et al.* (1998) ont calculé un facteur spatial (à partir d'un test de rotation mentale, d'un test d'orientation spatiale et d'un test mesurant le sens de la direction⁵) et un facteur verbal (avec un test de vocabulaire et un test de production de mots⁶). Ils ont montré des corrélations négatives avec le temps et le nombre d'erreurs uniquement pour le facteur spatial. En effet, plus les performances spatiales des sujets sont bonnes, moins ils mettent de temps et font d'erreurs pour réaliser la tâche. Cependant, l'analyse détaillée des résultats pour chaque test révèle une corrélation des performances de navigation avec les trois tests spatiaux mais également avec le test de vocabulaire. Dans une étude ultérieure, ce même auteur (Moffat *et al.*, 2001), a montré l'impact des mémoires verbale et visuelle et de l'efficacité en rotation mentale sur la performance de navigation dans un labyrinthe. Ces résultats sont également cohérents avec ceux de Diaz & Sims (2003) et de Cutmore *et al.* (2000) qui montrent que les utilisateurs efficaces dans l'acquisition de connaissances dans l'environnement virtuel sont les utilisateurs performants en capacités spatiales et en mémoire spatiale. Diaz & Sims (2003) ont montré que les utilisateurs performants en orientation spatiale sont meilleurs dans des tâches d'estimation des distances dans un environnement virtuel que les utilisateurs peu performants. Cutmore *et al.* (2000), quant à eux, ont observé que les utilisateurs bons aux épreuves de mémoire spatiale estimaient mieux les distances entre des points de repère dans un environnement virtuel. Pour contrôler l'effet du sexe sur les capacités spatiales, cette étude a été effectuée uniquement sur une population féminine.

5. Ce dernier test permet de mesurer comment un individu se repère dans un environnement.

6. Ces tests ne sont pas qualifiés de test de mémoire verbale car ils font appel à des connaissances sémantiques

4.1.4 Conclusion

Divers résultats expérimentaux viennent d'être présentés, ils sont résumés dans le tableau 4.1. Ces résultats montrent que la tâche de recherche d'itinéraire a fait l'objet de nombreuses études au contraire de celles de locomotion et de manipulation. Ils montrent également que les performances en locomotion semblent être uniquement corrélées aux capacités spatiales et qu'aucune étude ne s'est focalisée sur la tâche de manipulation.

Caractéristiques de l'utilisateur	Performances dans les tâches		
	Locomotion	Recherche d'itinéraire	Manipulation
Mémoire verbale	Pas de corrélation (Waller, 2000)	Corrélation positive (Moffat <i>et al.</i> , 2001)	?
Mémoire visuo-spatiale	?	Corrélation positive (Cutmore <i>et al.</i> , 2000 ; Moffat <i>et al.</i> , 2001)	?
Capacités spatiales	Corrélation positive (Waller, 2000)	Corrélation positive (Waller, 2000 ; Moffat <i>et al.</i> , 1998 ; Diaz & Sims, 2003)	?

La notation *corrélation positive* signifie que plus les sujets ont une bonne mémoire verbale ou visuo-spatiale, ou de bonnes capacités spatiales, plus ils sont efficaces dans la tâche. Les ? signifient que nous n'avons pas identifié d'études concernant cette configuration.

Tableau 4.1 – *Principaux résultats expérimentaux concernant les capacités spatiales*

Dans ce travail de recherche, nous nous focalisons sur les tâches de locomotion et de manipulation qui ont fait l'objet de peu d'études. D'après ces résultats, plusieurs hypothèses peuvent être faites. Celles-ci sont indiquées dans le tableau 4.2. D'une part, les résultats observés par Waller (2000) (indiqués en gras dans le tableau 4.2) devraient être reproduits, ce qui signifie qu'un haut niveau de capacités spatiales devraient impliquer de bonnes performances de locomotion ; par contre la mémoire verbale ne devrait pas être corrélée à ces performances de locomotion. D'autre part, les capacités spatiales étant sous la dépendance de la mémoire de travail spatiale et de l'administrateur central (Miyake *et al.*, 2001 ; Hegarty *et al.*, 2000 ; Shah & Miyake, 1996), il peut être pertinent de supposer que la mémoire spatiale et les fonctions de contrôles pourraient également influencer la performance de locomotion. Des hypothèses similaires peuvent être faites pour la manipulation puisque cette tâche est une tâche visuo-spatiale relativement identique à la locomotion.

Une autre caractéristique de l'utilisateur impliquée dans la performance en réalité virtuelle est la dépendance-indépendance à l'égard du champ. Nous l'étudions maintenant.

Caractéristiques de l'utilisateur	Performances dans les tâches	
	Locomotion	Manipulation
Mémoire verbale	Pas de corrélation	Pas de corrélation
Mémoire visuo-spatiale	Corrélation positive	Corrélation positive
Fonctions de contrôle	Corrélation positive	Corrélation positive
Capacités spatiales	Corrélation	Corrélation positive

La notation *corrélation positive* signifie que plus les sujets ont une bonne mémoire verbale ou visuo-spatiale, ou de bonnes capacités spatiales, plus ils sont efficaces dans la tâche. Le texte en gras indique que ces résultats ont été confirmés par d'autres auteurs expérimentalement (*cf.* tableau 4.1).

Tableau 4.2 – *Principales hypothèses découlant de l'étude des capacités spatiales*

4.2 La dépendance-indépendance à l'égard du champ

Nous introduisons maintenant, les travaux reliant la performance en réalité virtuelle et la dépendance-indépendance à l'égard du champ. Dans un premier temps, les styles cognitifs seront définis, puis dans un deuxième temps nous nous intéresserons spécifiquement à la dépendance-indépendance à l'égard du champ. Enfin, dans un troisième temps, les travaux reliant la performance en réalité virtuelle et ce style cognitif seront présentés. Nous notons que peu d'études expérimentales en réalité virtuelle se sont focalisées sur la dépendance-indépendance à l'égard du champ. C'est pourquoi, la réflexion sera essentiellement basée sur des études issues du domaine des hypermédias et des hypertextes.

4.2.1 Les styles cognitifs

Les styles cognitifs peuvent se définir comme un mode caractéristique du fonctionnement cognitif révélé lors d'activités perceptives et intellectuelles (Allport, 1937). Witkin *et al.* (1978) définissent les styles cognitifs comme les différences individuelles dans la manière dont nous percevons, pensons, apprenons, résolvons les problèmes *etc.* Ils nous informent sur le fonctionnement cognitif des individus mais aussi sur des aspects de leur personnalité. Ces styles cognitifs ont comme propriété essentielle d'être bipolaires. C'est-à-dire que selon les circonstances et la tâche à réaliser, les individus appartenant à un pôle sont plus ou moins performants (Witkin, 1976). Les individus sont caractérisés par leur position sur un continuum entre ces deux pôles (Huteau, 1987). Cette caractéristique permet notamment de les distinguer de l'intelligence et des aptitudes (telles que les capacités spatiales), considérées directionnelles et valorisées puisqu'il est préférable d'avoir un haut niveau d'aptitude. Ces styles cognitifs ont souvent été étudiés pour leur influence sur les préférences d'apprentissage (Messick, 1976). Pour cette raison, les termes styles cognitifs et styles d'apprentissage sont souvent utilisés

abusivement de façon interchangeable bien qu'ils soient mesurés avec des approches différentes (Jonassen & Grabowski, 1993). Un grand nombre de dimensions de styles cognitifs ont été proposées : dépendants *vs.* indépendants à l'égard du champ (Asch & Witkin, 1948a ;b ; Witkin *et al.*, 1978), globaux *vs.* analytiques, verbaux *vs.* imageurs (Riding & Cheema, 1991), réflexivité *vs.* impulsivité (Kagan *et al.*, 1964). Le lecteur pourra consulter une revue sur les styles cognitifs dans Riding & Rayner (1998). Dans cette étude, nous nous intéresserons uniquement à la dépendance-indépendance à l'égard du champ, qui est le style cognitif principal dans le domaine du traitement de l'information visuo-perceptive.

4.2.2 *Dépendance-indépendance à l'égard du champ*

Les premiers auteurs à avoir identifié ce style cognitif sont Asch et Witkin (Asch & Witkin, 1948a ;b) en montrant une importante variabilité inter-individuelle dans l'appréhension de la verticale. Cette perception de la verticale est déterminée par l'utilisation préférentielle d'un système de référence visuelle ou d'un système de référence posturale (gravitaire ou proprioceptive).

Une des principales techniques permettant de mesurer cette perception de la verticale est l'épreuve de la baguette et du cadre (ou le *Rod and Frame Test RFT*). Les sujets sont placés dans l'obscurité et doivent ajuster une baguette lumineuse à la verticale. La baguette est positionnée à l'intérieur d'un carré lumineux dont les côtés ne sont pas orientés parallèlement aux murs ou au sol de la pièce. Les sujets doivent procéder à l'ajustement de la baguette dans différentes configurations : le corps droit, le corps incliné à gauche et le corps incliné à droite. Pour se repérer, les sujets disposent seulement d'informations visuelles (la baguette lumineuse) et d'informations posturales (l'orientation de leur corps). Les sujets se basant sur le système de référence visuel, également appelé *dépendants à l'égard du champ*, vont faire des erreurs pour ajuster la baguette tandis que les sujets se basant sur le système de référence postural, les *indépendants à l'égard du champ* ne vont pas en faire. Entre ces deux pôles, se situent la majorité des sujets qui utilisent les deux modes, mais se distinguant par la pondération qu'ils attribuent à l'un par rapport à l'autre.

Des corrélations entre ces tests de la perception de la verticale et des épreuves perceptives, notamment l'*EFT*, *Embedded Figures Test* de Oltman *et al.* (1971) ont été montrées. Dans cette épreuve, les sujets doivent trouver une forme simple contenue dans une forme plus complexe. Ainsi, les sujets utilisant des références visuelles pour percevoir la verticale, les dépendants à l'égard du champ, éprouvent des difficultés à repérer un dessin géométrique quand il est intégré dans une figure complexe tandis que les sujets utilisant des références posturales, les indépendants à l'égard du champ, sont très performants pour identifier la forme recherchée.

Les indépendants à l'égard du champ, sont aptes à articuler des contenus visuels peu

structurés. Ils sont actifs dans leur perception et ont tendance à prélever de nombreuses informations, quelle que soit leur pertinence (Dickstein, 1968). Tandis que les dépendants à l'égard du champ perçoivent le champ visuel dans un état informe. Ils sont passifs dans leur perception et ont tendance à ignorer les indices qui ne sont pas dominants dans le champ visuel (Dickstein, 1968). De nombreuses études ont noté que la distinction entre dépendants à l'égard du champ et indépendants à l'égard du champ est un cas particulier propre au domaine perceptif de la différenciation : global, analytique (Riding, 1991 ; Jonassen & Grabowski, 1993). Les dépendants à l'égard du champ voient l'image de façon globale et ignorent les détails, tandis que les indépendants à l'égard du champ se focalisent sur les détails et sont plus sériels dans leur approche. Les sujets indépendants à l'égard du champ étant plus actifs dans leur perception sont plus aptes à mettre en place des processus vicariants et à changer de stratégie (Oltman *et al.*, 1971). Ainsi, un sujet indépendant peut adopter une stratégie globale si la tâche le nécessite, la réciproque pour les sujets dépendants n'est pas nécessairement vraie.

L'indépendance à l'égard du champ est souvent associée à un haut niveau de capacités spatiales (Richardson & Turner, 2000). Les recherches dans ce domaine montrent que la dépendance-indépendance à l'égard du champ mesurée avec l'*EFT* est corrélée positivement avec les scores obtenus aux tests spatiaux, notamment ceux de visualisation spatiale (Richardson & Turner, 2000 ; Dubois & Cohen, 1970 ; Satterly, 1976 ; Spotts & Mackler, 1967) mais également avec ceux d'orientation spatiale (Gardner *et al.*, 1960 ; McGee, 1979 ; McKenna, 1984). Certains auteurs proposent même de considérer ce style cognitif comme une aptitude spatiale particulière (McKenna, 1984 ; 1990 ; MacLeod & Jackson, 1986). De plus, Miyake *et al.* (2001) ont proposé de définir la dépendance-indépendance à l'égard du champ, comme les capacités spatiales, en terme d'efficience du fonctionnement du calepin visuo-spatial et de l'administrateur central. Il est également important de noter qu'il existe de légères différences dans la dépendance-indépendance à l'égard du champ entre les hommes et les femmes. Les hommes semblent être plus indépendants que les femmes (Oltman *et al.*, 1971). Cependant certains auteurs suggèrent que cette différence résulte de celles observées sur les capacités spatiales (Sherman, 1967).

Pour conclure, il est important de noter que les sujets indépendants à l'égard du champ perçoivent analytiquement le champ environnant et sont aptes à distinguer du contexte général les traits essentiels et dominants tandis que, les sujets dépendants ne se détachent pas du contexte dominant et réagissent globalement à la situation sans en analyser les divers éléments. De plus, les sujets indépendants à l'égard du champ sont peu sensibles aux orientations visuelles contextuelles perturbatrices car ils privilégient les informations proprioceptives et vestibulaires pour repérer la verticale, ils utilisent des références égocentriques (basées sur le référentiel gravitaire). Les sujets dépendants, quant à eux, sont sensibles à ce type d'informations et traitent préférentiellement les informations visuelles perçues en utilisant une référence

exocentrique (Huteau, 1987).

Dans le chapitre 2, nous avons montré l'impact des référentiels spatiaux sur les tâches d'interaction en réalité virtuelle. La dépendance-indépendance à l'égard du champ entrant en jeu dans la perception et l'appréhension des référentiels spatiaux, nous pouvons supposer qu'elle puisse avoir un impact sur la performance en réalité virtuelle. Nous présentons les principales études expérimentales ayant montré cet impact.

4.2.3 Dépendance-indépendance à l'égard du champ et performance en réalité virtuelle

Très peu d'études se sont focalisées sur l'impact de la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur la performance en réalité virtuelle. Cependant, elle est citée comme influençant la performance dans de nombreux travaux (Boyd, 1995 ; Stanney *et al.*, 1998 ; Salzman *et al.*, 1999b ; Pasquier *et al.*, 1999 ; Fuchs & Moreau, 2003 ; Brouwer, 2005). Par exemple, Boyd (1995) affirme que la dépendance à l'égard du champ affecte la performance en réalité virtuelle puisque ce style cognitif reflète la capacité d'un individu à orienter un objet en fonction de sa propre orientation et du contexte visuel. Ce qui correspond effectivement à ce que doit réaliser un individu lorsqu'il manipule un objet dans un environnement virtuel. Brouwer (2005), quant à lui, fait l'hypothèse que les individus indépendants à l'égard du champ sont capables d'isoler un nombre important de détails dans un environnement riche (tel qu'un environnement virtuel) en ignorant les informations non pertinentes. Selon Brouwer (2005), les sujets indépendants à l'égard du champ devraient être plus performants dans les tâches de réalité virtuelle que les sujets dépendants à l'égard du champ.

Cependant, seule l'étude de Ogle (2002) se focalise sur les relations entre les performances en réalité virtuelle et la dépendance-indépendance à l'égard du champ. Plus précisément, Ogle, *op. cit.*, a étudié l'impact de la réalité virtuelle sur la qualité de l'apprentissage en fonction du style cognitif des sujets mesuré par l'*EFT*. Un hypermédia sur le cœur humain était présenté à des sujets, ils devaient le parcourir pendant vingt-cinq minutes et apprendre le maximum d'informations. Deux configurations de test étaient proposées aux sujets. Dans la première configuration, les sujets pouvaient manipuler un cœur humain représenté dans un environnement virtuel. Dans la seconde configuration, seulement des images étaient proposées au sujet. A la fin de la phase d'apprentissage, une série de quarante questions à choix multiples concernant le cœur humain était posée aux sujets. Les résultats indiquent clairement que les sujets indépendants à l'égard du champ ont acquis davantage d'informations quelle que soit la configuration utilisée. Les résultats montrent également que dans la configuration utilisant uniquement des images, tous les sujets ont des performances similaires, tandis que dans celle utilisant un environnement virtuel, les sujets indépendants à l'égard du champ sont meilleurs

que les sujets dépendants. La dépendance-indépendance à l'égard du champ semble donc avoir un impact sur l'utilisation et l'intégration d'un matériel virtuel.

Si peu d'études se sont intéressées à l'impact de la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur la performance en réalité virtuelle, de très nombreuses études se sont focalisées sur son impact dans le cadre des hypermédias ou des hypertextes (Chen & Macredie, 2002). Parkinson & Redmond (2002) ont montré que les sujets indépendants à l'égard du champ sont meilleurs pour utiliser internet que les sujets dépendants à l'égard du champ. Chen & Ford (1998), quant à eux, ont demandé à des étudiants d'acquérir des informations relatives à l'intelligence artificielle à travers l'utilisation d'un hypertexte. Ils ont montré que les sujets dépendants à l'égard du champ utilisent préférentiellement le menu principal, tandis que les indépendants, utilisent les boutons de navigation "*page suivante*", "*page précédente*". Ainsi, selon leur style cognitif, les sujets utilisent des stratégies de navigation différentes. Un résultat similaire a été montré par Liu & Reed (1994). Lors de l'utilisation d'un hypermédia, les sujets dépendants auraient une stratégie linéaire. Leader & Klein (1996) ont complété cette étude en montrant que les indépendants utilisaient davantage les index, les cartes. Ces résultats ont été complétés grâce aux études de Palmquist & Kim (2000) et de Kim (2001). En effet, ces travaux ont étudié les effets conjoints de l'expertise et du style cognitif mesuré par l'*EFT* dans la recherche d'informations sur internet. Palmquist & Kim ont demandé à des étudiants de rechercher des informations sur un sujet précis. La performance de recherche était mesurée en terme de temps nécessaire et de nombre de nœuds traversés pour localiser un item pertinent. Ils trouvèrent une interaction entre les styles cognitifs et l'expérience dans la recherche d'informations. Les dépendants à l'égard du champ novices prennent plus de temps et traversent plus de nœuds pour localiser des informations pertinentes que les indépendants à l'égard du champ novices. Aucune différence n'apparaît pour les chercheurs experts. Des résultats similaires ont été trouvés par Kim. Nous reviendrons sur l'impact de l'expertise sur la performance d'interaction dans le paragraphe 4.3.

4.2.4 Conclusion

Ces différents travaux montrent clairement l'impact de la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur les stratégies de navigation dans un hypertexte ou un hypermédia, ils montrent également que cet impact peut être modulé par l'expertise dans la tâche.

Néanmoins, ces travaux n'utilisent pas de système de réalité virtuelle. Seule l'étude de Ogle (2002) permet de supposer un impact de la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur la performance en réalité virtuelle (*cf.* tableau 4.3).

Cependant de nombreux auteurs ont fait l'hypothèse d'un impact de ce style cognitif sur la performance (Boyd, 1995 ; Stanney *et al.*, 1998 ; Salzman *et al.*, 1999b ; Pasquier *et al.*, 1999 ;

Caractéristiques de l'utilisateur	Performances dans les tâches		
	Locomotion	Recherche d'itinéraire	Manipulation
Dépendance-Indépendance à l'égard du champ	?	?	Indépendants > Dépendants (Ogle, 2002)

Les ? signifient que nous n'avons pas identifié d'études concernant cette configuration.

Tableau 4.3 – *Principaux résultats expérimentaux concernant la dépendance-indépendance à l'égard du champ*

Fuchs & Moreau, 2003 ; Brouwer, 2005), nous pouvons donc supposer que ce style cognitif va influencer la performance dans les tâches d'interaction en réalité virtuelle (*cf.* tableau 4.4). Cette hypothèse peut être étayée en rappelant que les tâches de manipulation et de locomotion ont été définies comme des tâches requérant soit la manipulation du point de vue de l'utilisateur, soit celle d'un objet. Or, la dépendance-indépendance à l'égard du champ définit les stratégies d'appréhension des référentiels spatiaux. Les sujets peuvent soit utiliser un référentiel égocentrique (centré sur l'individu) et sont indépendants, soit un référentiel exocentrique (centré sur l'objet) et sont dépendants. La même dichotomie, que celle observée pour définir les tâches, est obtenue. Il est donc aisé de faire l'hypothèse d'un lien entre les performances dans ces tâches et l'appréhension des référentiels spatiaux. Les sujets dépendants risquent donc rencontrer davantage de difficultés lors de la réalisation d'une tâche de locomotion puisque cette tâche ne nécessite pas l'utilisation d'un référentiel spatial exocentrique. L'étude de Ogle (2002) ayant montré que les dépendants sont moins bons que les indépendants dans les tâches de manipulation, qui pourtant est congruente avec un référentiel exocentrique. Nous pouvons faire l'hypothèse que ces sujets dépendants auront des performances très faibles en locomotion.

Caractéristiques de l'utilisateur	Performances dans les tâches	
	Locomotion	Manipulation
Dépendance-Indépendance à l'égard du champ	Indépendants >> Dépendants	Indépendants > Dépendants

Le texte en gras indique que ces résultats ont été confirmés par d'autres auteurs expérimentalement (*cf.* tableau 4.3).

Tableau 4.4 – *Principales hypothèses découlant de l'étude de la dépendance-indépendance à l'égard du champ*

Nous poursuivons cette analyse des caractéristiques de l'utilisateur, en introduisant une caractéristique essentielle: son expérience dans le domaine de l'application, de la tâche à réaliser, de la technologie, de l'interface, du domaine *etc.*

4.3 *L'expérience des utilisateurs*

Dans cette partie, nous nous focalisons sur l'expérience de l'utilisateur. En effet, en ergonomie cognitive, l'analyse de l'utilisateur passe par l'étude de son niveau de compétence, d'expérience dans la tâche, dans le domaine de l'application, dans l'utilisation de l'interface, de la technologie *etc.* (Egan, 1988 ; Nielsen *et al.*, 1993 ; Dix *et al.*, 1998 ; Boy, 2003). Nous notons, dès à présent, que nous ne nous plaçons pas dans le cadre des travaux sur l'expertise et des performances exceptionnelles tels que peuvent, par exemple, les définir les travaux princeps sur les joueurs d'échecs experts (Chase & Simon, 1973) ou les travaux postérieurs sur l'expertise (Salthouse, 1991 ; Ericsson & Smith, 1991 ; Ericsson *et al.*, 1993 ; Ericsson & Kintsch, 1995 ; Ericsson & Lehmann, 1996 ; Ericsson, 1999). L'expertise dans sa forme la plus extrême peut se définir comme une compétence exceptionnelle particulière, souvent professionnelle, acquise par un grand nombre d'années de pratique (une dizaine d'années) (Ericsson *et al.*, 1993). Nous préférons employer les termes de niveau d'expérience ou de compétences dans une tâche ou dans la technologie.

De très nombreuses études se sont focalisées sur l'acquisition d'expérience, nous nous focaliserons uniquement sur les théories, modèles et résultats expérimentaux issus du domaine de l'interaction homme-machine. Dans ce domaine, l'un des principaux modèles proposés est celui de *la loi de la pratique* selon lequel plus un utilisateur réalise une tâche, moins il a besoin de temps pour la réaliser (Egan, 1988 ; Newell & Rosenbloom, 1981). Cette modélisation bien que pertinente d'un point de vue pratique (car elle permet de prédire la performance d'un utilisateur) est peu satisfaisante.

Pour tenter de mieux comprendre cet impact de l'expérience sur la performance, le modèle des niveaux d'activité de Rasmussen (1986) qui est le modèle le plus fréquemment usité en interaction homme-machine sera présenté ainsi que quelques études expérimentales montrant le lien existant entre la performance de l'utilisateur et son niveau d'expérience.

4.3.1 *Le modèle des niveaux d'activité (Rasmussen, 1986)*

L'observation d'un utilisateur en situation d'activité montre explicitement qu'une même situation peut poser problème à un novice et être un cas de routine pour un utilisateur expérimenté. Les utilisateurs n'auront donc pas le même comportement, leurs représentations et leurs connaissances utilisées ne seront pas les mêmes. Rasmussen et ses collaborateurs (Rasmussen, 1986 ; Rasmussen *et al.*, 1994) ont proposé un modèle distinguant trois niveaux d'activité, ou de fonctionnement pour un opérateur selon que les décisions qu'il doit prendre pour réaliser une tâche relèvent d'habiletés, de règles ou de connaissances (*cf.* figure 4.1). Ces trois niveaux sont souvent associés à la diminution du niveau de familiarité avec la tâche.

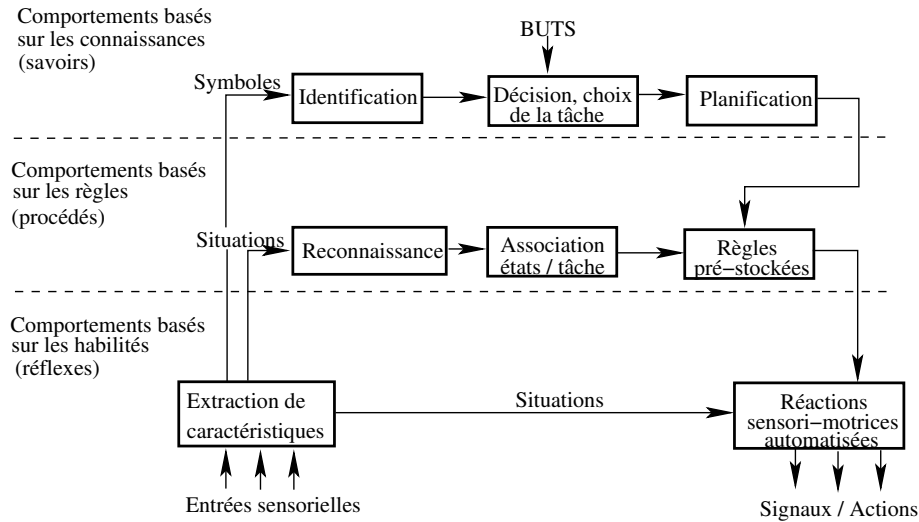


Figure 4.1 – Le modèle des niveaux d'activités

1. Le premier niveau (le plus bas sur la figure 4.1), le *niveau réflexe* est basé sur les habiletés (*skill-based behavior*). Il représente les actions sensori-motrices effectuées par l'utilisateur sans réel contrôle conscient, de façon rapide et souvent automatique. L'utilisateur compose et utilise des ensembles de sous-programmes sensori-moteurs automatisés adaptés aux buts spécifiques de la tâche. Ces programmes peuvent être considérés comme des connaissances procédurales stockées en mémoire à long terme. C'est le niveau engendrant le moins d'efforts cognitifs. Par conséquent, l'exécution parallèle de différentes tâches est possible. Les activités de ce type laissent les ressources cognitives disponibles pour d'autres activités.
2. Le second niveau (le central sur la figure 4.1), le *niveau des procédés* est basé sur les règles (*rule-based behavior*). Les comportements de ce niveau fonctionnent sur des règles pré-stockées; l'utilisateur, son but et son environnement fournissant les paramètres de la règle. Si l'utilisateur n'a pas vécu de situation identique, il utilise une règle valable dans une situation analogue. Tandis que les comportements basés sur les habiletés sont en grande partie automatiques, ceux basés sur les règles sont schématiques et basés sur des savoirs-faire explicites. Le traitement parallèle est possible, bien que ce niveau d'activité exige un niveau minimum d'attention.
3. Le dernier niveau (le plus haut sur la figure 4.1), le *niveau du savoir* est basé sur les connaissances (*knowledge-based behavior* ou *model-based behavior*). Ce niveau de comportement est utilisé lorsque aucun réflexe ou aucune règle ne convient à la situation rencontrée. L'utilisateur se trouve alors confronté à un processus de résolution de problème. Son comportement doit alors s'appuyer sur un modèle mental de la situation.

Les traitements effectués sont conscients, lents, séquentiels et coûteux d'un point de vue attentionnel. Les comportements basés sur les connaissances sont spécifiques à un événement et sont conduits par des buts explicitement formulés, nécessitant le développement de plan.

Selon Rasmussen (1986), le comportement humain utilise simultanément ces trois niveaux. Le niveau du savoir définit les buts, les deux autres se chargent de les satisfaire en fonction de leurs compétences. Par exemple, lorsque un utilisateur expérimenté cherche son chemin dans un environnement virtuel, les connaissances de l'utilisateur sur cet environnement (niveau du savoir) permettent de planifier la trajectoire du déplacement. Les règles (niveau des procédés) dont dispose l'utilisateur lui permettent de déterminer la procédure de déplacement à utiliser, tandis que les habilités (niveau réflexe) motrices de l'utilisateur soutiennent la manipulation de l'interface. Cependant, pour un utilisateur inexpérimenté, la simple tâche de manipulation de l'interface peut nécessiter la mise en oeuvre du niveau des connaissances ou des procédés, puisque l'interaction n'est pas encore automatisée. Ainsi, selon leur expertise, les utilisateurs vont se différencier selon les niveaux auxquels ils font appel. Le développement de l'expertise s'accompagne donc d'un déplacement du niveau des connaissances vers le niveau réflexe (Rasmussen *et al.*, 1994). A la vue de la complexité des tâches d'interaction en réalité virtuelle, pour les utilisateurs novices, ce déplacement du niveau des connaissances vers le niveau réflexe, risque de demander un temps d'apprentissage important et, d'être coûteux d'un point de vue attentionnel. C'est pourquoi l'objectif d'un concepteur d'interfaces va être de minimiser les connaissances nécessaires à son utilisation.

En réalité virtuelle, et plus particulièrement en interaction homme-machine, de très nombreux travaux ont montré l'impact de cette expérience des utilisateurs sur la performance, nous en introduisons quelques-uns à titre d'exemples.

4.3.2 *Expérience et performance en réalité virtuelle*

Dans le cadre de l'interaction homme-machine, de nombreux travaux (Marchionini & Shneiderman, 1988 ; Marchionini, 1995 ; Lazonder *et al.*, 2000) se sont intéressés à l'effet de l'expérience durant des tâches de recherche d'informations. Ils ont montré que les utilisateurs expérimentés sont plus précis et mettent moins de temps que les novices pour localiser une information. Ces recherches ont été confirmées par les travaux de Kim (2001) et de Palmquist & Kim (2000) (présentés dans la section 4.2). Leurs résultats sont particulièrement intéressants car ils révèlent que lorsque les utilisateurs sont expérimentés dans la tâche, les dépendants et les indépendants à l'égard du champ ont des performances en réalité virtuelle similaires. Par contre, lorsque les utilisateurs sont novices dans la tâche, les indépendants sont plus performants que les dépendants à l'égard du champ. L'expertise permet donc de minimiser l'impact

de la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur la performance. Des résultats similaires concernant les capacités spatiales ont été montrés par Benyon (1993) sur la navigation dans une base de données. Les utilisateurs ayant un bon niveau de capacités spatiales sont plus performants que les utilisateurs ayant un niveau plus faible. Cependant, les experts en recherche d'informations dans une base de données, quelles que soient leurs capacités spatiales, ont des performances similaires. Ces travaux nous permettent de conclure que l'expérience dans une tâche peut permettre de compenser les déficiences dues à des difficultés en capacités spatiales ou à la dépendance à l'égard du champ.

Concernant la réalité virtuelle, nous citerons les travaux de Moffat *et al.* (2001) et de Waller (2000) que nous avons déjà présentés dans la section 4.1. Moffat *et al.* (2001) ont demandé à des utilisateurs de compléter une tâche de recherche de cible dans un labyrinthe virtuel. Ils ont montré que les utilisateurs expérimentés dans l'utilisation des ordinateurs sont plus rapides pour trouver une cible dans ce labyrinthe que des utilisateurs novices. Waller (2000), quant à lui, n'a pas montré de relation entre l'expérience et l'utilisation efficace de l'interface. Ce résultat peut paraître contradictoire. Cependant, il peut se justifier par les indicateurs utilisés par cet auteur. En effet, il propose un indicateur commun mesurant l'expérience des ordinateurs, de la réalité virtuelle, mais également l'attitude de l'utilisateur envers l'informatique (méfiant, motivé *etc.*). Il est possible que le manque de spécificité de cet interacteur explique l'absence de corrélation significative entre expérience et performance.

Cette réflexion nous amène à la principale limitation de ces études : la mesure du degré d'expérience de l'utilisateur. Classiquement, des questionnaires sont utilisés (Waller, 2000 ; Lazonder *et al.*, 2000 ; Palmquist & Kim, 2000 ; Kim, 2001). Cependant, chaque étude utilise un questionnaire différent et non standardisé. Ces mesures sont donc subjectives, soumises à caution et il est difficile de généraliser les résultats obtenus. La seconde limitation de ces études est la multiplication des niveaux d'expérience. En effet, pour être efficient en interaction homme-machine, un utilisateur doit avoir un bon niveau d'expérience dans le domaine de l'application, dans la tâche qu'il doit réaliser, dans la technologie qu'il utilise *etc.* Ainsi, dans une application de recherche d'informations sur un thème particulier (par exemple la réalité virtuelle), plus l'utilisateur aura une bonne connaissance du thème étudiée (la réalité virtuelle), plus sa recherche sera efficace. De plus, un utilisateur expérimenté en recherche d'informations sera plus efficient pour utiliser les expressions logiques (et, ou *etc.*). Enfin plus l'utilisateur est rapide dans l'utilisation d'un clavier et dans la navigation hypertexte, plus sa tâche de recherche d'informations sera facilitée. Ainsi, les différentes expériences de l'utilisateur vont toutes influencer sa performance d'interaction en réalité virtuelle. L'identification et l'évaluation exhaustive de toute ces niveaux d'expérience étant problématiques, il convient de sélectionner les expériences pouvant avoir le plus d'influence sur la performance, dans notre cas l'expérience en réalité virtuelle et en jeux vidéo.

4.3.3 Conclusion

Dans cette section, le modèle des niveaux d'activité (Rasmussen, 1986 ; Rasmussen *et al.*, 1994) a été développé. Ce modèle permet de modéliser l'acquisition d'une expérience par un utilisateur. Ainsi l'utilisateur expérimenté utilisera un comportement basé sur des règles ou des réponses réflexes pour interagir avec un système informatique, tandis qu'un utilisateur novice utilisera un comportement basé sur des connaissances. Nous pouvons donc supposer des différentiels de performances pour réaliser une activité, les expérimentés pouvant se baser sur des comportements automatiques, rapides et peu coûteux, tandis que les novices se basent sur des comportements contrôlés, lents et coûteux d'un point de vue attentionnel.

Les quelques résultats expérimentaux que nous avons développés sont, en partie, cohérents avec cette position (*cf.* tableau 4.5). En effet, les travaux de Moffat *et al.* (2001) confirment cette position tandis que ceux de Waller (2000) sont en contradiction. Cette absence de consensus peut se justifier par la mesure utilisée pour évaluer l'expérience de l'utilisateur. Ce résultat de Waller (2000) montrant que les sujets inexpérimentés ont des performances similaires aux sujets expérimentés étant en contradiction avec l'ensemble des résultats classiques issus de l'interaction homme-machine (Egan, 1988 ; Nielsen *et al.*, 1993 ; Dix *et al.*, 1998 ; Boy, 2003), ne sera pas considéré dans nos hypothèses. Nous supposons que plus l'utilisateur est expérimenté, plus il sera efficient dans la tâche.

Caractéristiques de l'utilisateur	Performances dans les tâches		
	Locomotion	Recherche d'itinéraire	Manipulation
Expérience dans la tâche	Expérimenté = Non expérimenté (Waller, 2000)	Expérimenté > Non expérimenté (Moffat <i>et al.</i> , 2001)	?

Les ? signifient que nous n'avons pas identifié d'études concernant cette configuration

Tableau 4.5 – Principaux résultats expérimentaux concernant l'expérience dans la tâche

Dans cette recherche, nous nous intéressons particulièrement à l'expérience en informatique et dans l'utilisation d'une technologie de réalité virtuelle. Selon notre conception de la réalité virtuelle décrite dans le chapitre 1, les jeux vidéo utilisant des environnements numériques tridimensionnels peuvent être considérés comme des applications de réalité virtuelle. Nous ferons donc l'hypothèse que l'expérience en réalité virtuelle et/ou en jeux vidéo devrait influencer la performance dans les tâches d'interaction (*cf.* tableau 4.6).

Caractéristiques de l'utilisateur	Performances dans les tâches	
	Locomotion	Manipulation
Expérience dans la tâche Expérience en jeux vidéo	Expérimentés > Non expérimentés	Expérimentés > Non expérimentés

Tableau 4.6 – Principales hypothèses découlant de l'étude d'expérience dans la tâche

Pour conclure cette étude sur les caractéristiques de l'utilisateur influençant la performance en réalité virtuelle, nous nous focalisons désormais sur les différences hommes / femmes.

4.4 Différences hommes / femmes

Les différences hommes / femmes sont un débat ancien et très courant en psychologie différentielle. Dans le cadre de cette revue de la littérature, nous avons mentionné que le sexe semble avoir un impact sur les capacités spatiales (Linn & Petersen, 1985 ; Voyer *et al.*, 1995), sur la mémoire spatiale (Stumpf & Eliot, 1995), sur la dépendance-indépendance à l'égard du champ (Oltman *et al.*, 1971) et même sur l'expérience dans l'utilisation d'une interface (Waller, 2000).

En fait, de nombreuses différences inter-individuelles observées sont dues au sexe des utilisateurs ; nous nous concentrons uniquement sur son impact sur la navigation en environnement réel (Evans, 1980). En effet, la navigation en environnement virtuel met en jeu des processus similaires à ceux en monde réel (*cf.* chapitre 2), nous proposons de compléter notre étude de l'impact du sexe sur la performance en réalité virtuelle, par celle sur cet impact en environnement réel.

4.4.1 Différences hommes / femmes et navigation en environnement réel

Dans les tests traditionnels des capacités spatiales, les hommes sont plus performants que les femmes, cependant cet effet semble dépendre des tests utilisés et du type de capacités spatiales mesurées. En effet, de nombreux résultats montrent que les hommes sont meilleurs dans certaines tâches spatiales, essentiellement dans les tâches de rotation mentale (Linn & Petersen, 1985 ; Voyer *et al.*, 1995), par contre les résultats ne sont plus systématiquement significatifs en ce qui concerne des tâches plus écologiques de navigation ou d'orientation spatiale dans un environnement réel (Montello *et al.*, 1999).

Les tâches d'orientation spatiale écologique et celles de capacités spatiales ont des caractéristiques différentes. Les premières impliquent un déplacement dans un environnement réel (ou sur des cartes de cet environnement) et l'acquisition de connaissances sur cet environnement, tandis que les secondes impliquent essentiellement du matériel papier-crayon.

Les études sur les tâches de navigation en environnement réel ont montré que les hommes sont plus performants pour les tâches d'apprentissage de route et de direction (Galea & Kimura, 1993 ; Waller *et al.*, 2001). Galea & Kimura, *op. cit.*, ont demandé à des sujets d'apprendre une route dessinée sur une carte d'une ville fictive. Leurs résultats ont indiqué que les hommes font moins d'erreurs et ont besoin de moins d'essais pour apprendre cette route

que les femmes. Ces résultats ont également montré que les hommes ont acquis une meilleure connaissance des propriétés géométriques de la carte (Nord, Sud, Est, Ouest) et que les femmes ont reconnu plus de points de repères (bâtiment particulier, croisement). Les hommes et les femmes semblent donc utiliser des stratégies, de navigation et d'orientation spatiale, différentes. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Lawton (1994) basés sur des mesures subjectives (à bases de questionnaires) qui montrent que les hommes et les femmes utilisent des stratégies différentes. En effet, les femmes utiliseraient préférentiellement une stratégie basée sur la localisation des points de repère les uns par rapport aux autres, tandis que les hommes utiliseraient une stratégie basée sur leur position relative par rapport à ces points de repère.

Cependant, certaines études ne montrent aucune différence entre les hommes et les femmes (Sadalla & Montello, 1989 ; Taylor & Tversky, 1992 ; Brown *et al.*, 1998 ; O'Laughlin & Brubaker, 1998). Ainsi, O'Laughlin & Brubaker (1998) ne montrent pas de différences dans la représentation d'une carte d'un environnement après l'avoir découvert à travers une cassette vidéo. Le manque de consensus sur ces résultats peut provenir des différences inter-individuelles en terme de niveau d'expérience, de niveau scolaire, de capacités spatiales, *etc.* Mais il peut également résulter de la diversité des tâches utilisées (mémorisation des points de repères ou de la route, dessin de carte, estimation des distances, description verbale de la route, apprentissage de labyrinthe *etc.*), de la diversité des environnements de test (carte, environnements réels de grandes ou petites tailles d'intérieur ou d'extérieur). L'une des principales hypothèses proposées par Coluccia & Louse (2004) pour expliquer ces différences entre les études est la variabilité inter-études dans la difficulté de la tâche, ainsi plus la tâche demande un traitement visuo-spatial important, plus les différences entre les sexes en faveur des hommes sont fortes. Cette hypothèse de Coluccia & Louse (2004) est cohérente avec les travaux de Vecchi & Girelli (1998). Ces auteurs ont étudié les différences entre les sexes dans les tâches de mémorisation et de manipulation du matériel visuo-spatial. Les résultats, en faveur des hommes, sont significatifs pour les tâches de manipulation et de traitement du matériel visuo-spatial tandis que pour les tâches de mémorisation ces différences sont plus faibles.

Ces quelques résultats sur la navigation en environnement réel montrent clairement que l'impact du sexe sur la performance est relativement mal défini et ne fait pas l'objet d'un consensus. La réalité virtuelle a souvent été proposée comme support pour explorer ces tâches de navigation. Nous présentons quelques travaux s'étant intéressés à l'impact du sexe sur ces tâches de navigation en environnement virtuel.

4.4.2 Différences hommes / femmes et performance en réalité virtuelle

Des études se sont intéressées à l'impact du sexe sur la performance en réalité virtuelle. Elles ont souvent également étudié les capacités spatiales, c'est pourquoi certaines ont déjà

été décrites dans la section 4.1.

Le principal résultat est que les hommes sont plus efficaces dans les tâches de navigation en environnement virtuel. Ainsi, dans Moffat *et al.* (1998), Moffat *et al.* (2001) et Cutmore *et al.* (2000), les résultats montrent que les hommes sont plus performants pour se repérer dans un labyrinthe virtuel que les femmes. Ils font moins d'erreurs de direction quand il s'agit de retrouver leur chemin et apprennent mieux la configuration de l'environnement virtuel (Moffat *et al.*, 1998). De plus, selon Cutmore *et al.* (2000), ils font moins de mouvement et sont plus précis. Pour compléter ces résultats, nous pouvons citer également les travaux de Waller (2000), qui a montré que les hommes sont plus efficaces que les femmes dans l'utilisation d'une interface de navigation en réalité virtuelle (un joystick). Enfin, dans une étude récente, Foreman *et al.* (2004) ont demandé à des sujets de parcourir un couloir virtuel contenant des objets spécifiques. Les sujets devaient ensuite se déplacer dans un couloir réel et indiquer la position de ces objets. Les hommes sont plus précis et font moins d'erreurs dans la localisation des objets quel que soit le mode d'interaction utilisé (tapis roulant, déplacement au clavier, visualisation du déplacement).

Pour expliquer ces différences de performances entre les hommes et les femmes, Moffat *et al.* (1998) mettent en avant que les hommes sont plus performants en capacités spatiales et nous avons mentionné précédemment que les performances en réalité virtuelle sont corrélées aux capacités spatiales. Selon Moffat *et al.* (1998), cet effet sexe résulterait donc de celui des capacités spatiales. Cependant, Waller *et al.* (1998) en comparant des tâches de navigation dans un labyrinthe réel et un labyrinthe virtuel a montré que ces différences de sexe étaient plus importantes en monde virtuel qu'en monde réel. Elle pourrait donc également provenir de la supériorité des hommes dans l'expérience des ordinateurs ou des jeux vidéo (Waller, 2000 ; Moffat *et al.*, 1998). Un autre résultat intéressant est celui de Moffat *et al.* (1998) qui a montré que les performances des hommes en navigation étaient corrélées à des mesures de capacités spatiales tandis que pour les femmes, ces performances sont également corrélées à des mesures de capacités verbales (mesurées par un test de vocabulaire et un test de production de mots). Ces résultats semblent également montrer des différences de stratégies dans l'appréhension du matériel visuo-spatial.

Pour conclure sur ces relations entre les performances de navigation et le sexe des utilisateurs, nous introduisons les études de Astur *et al.* (2004) et Sandstrom *et al.* (1998). Ces deux auteurs ont reproduit le paradigme expérimental de *la piscine de Morris*, traditionnellement utilisé pour tester la mémoire spatiale des rats, dans un environnement virtuel. Les utilisateurs doivent retrouver une plate forme immergée dans une piscine. L'eau de la piscine est colorée afin que l'utilisateur ne puisse pas voir la plate forme. L'utilisateur doit compléter le test plusieurs fois, jusqu'à qu'il ait appris où se localise la piscine. Pour l'aider, il dispose

de points de repères positionnés autour de la piscine, mais également selon les conditions expérimentales, d'informations géométriques (par exemple, la forme de la piscine). Astur *et al.* (2004) et Sandstrom *et al.* (1998) ont montré une supériorité des hommes pour réaliser ce type de tâche. Cependant, l'expérimentation de Sandstrom *et al.* a surtout mis en exergue que les hommes utilisent à la fois les points de repères disposés autour de la piscine, mais également les informations géométriques fournies par la forme des bords de la piscine, tandis que les femmes n'utilisent que les points de repères. Ces résultats montrent clairement la supériorité des hommes dans les tâches de navigation, cette supériorité pouvant provenir de leur supériorité en capacités spatiales, dans l'utilisation de la technologie, ou dans la mise en place de stratégies différentes pour se repérer.

Tous ces résultats concernent essentiellement les tâches de navigation. Il existe cependant une étude (Parsons *et al.*, 2004) qui s'est intéressée à la tâche de manipulation. En effet, ces auteurs ont reproduit un test de rotation mentale en réalité virtuelle. La tâche consistait à orienter un objet dans la même orientation qu'un autre objet présenté simultanément. L'interacteur moteur utilisé était un capteur de position tenu dans la main. Ils ont demandé aux sujets de compléter ce même test mais dans sa version classique papier-crayon de Vandenberg & Kuse (1978). Les résultats montrent une différence significative de performance entre les hommes et les femmes dans le test papier-crayon mais par contre aucune différence significative n'est observée dans le test virtuel que ce soit en termes d'efficacité (dépendante de la trajectoire parcourue) ou de temps de réalisation de la tâche. Ce résultat montre que les performances en manipulation d'un objet en environnement virtuel ne semblent pas dépendre du sexe des utilisateurs.

4.4.3 Conclusion

L'étude de la navigation en environnement réel a révélé que les différences entre les sexes ne sont pas systématiques dans ce type de tâche, cependant les études en réalité virtuelle semblent toutes converger en faveur d'une supériorité des performances masculines (*cf.* tableau 4.7). Précédemment, l'impact du sexe sur les capacités spatiales, l'efficacité dans l'utilisation de l'interface, la dépendance-indépendance à l'égard du champ ont été largement démontrés. Or, tous ces facteurs influencent également la performance en réalité virtuelle. Il semble donc difficile d'isoler l'effet du sexe sur la performance en réalité virtuelle. C'est pourquoi, dans cette recherche, le sexe sera considéré comme un facteur secondaire. Il ne sera pas explicitement étudié et nous ne faisons aucune hypothèse sur son impact sur la performance. Nous contrôlerons notre population de test afin qu'elle soit constituée d'autant d'hommes que de femmes.

Grâce à l'étude de ces différentes caractéristiques de l'utilisateur, un certain nombre d'hypothèses concernant leurs impacts sur la performance en réalité virtuelle a été proposé. Elles

Caractéristiques de l'utilisateur	Performances dans les tâches		
	Locomotion	Recherche d'itinéraire	Manipulation
Différences Hommes / Femmes	Hommes > Femmes (Waller, 2000)	Hommes > Femmes (Moffat <i>et al.</i> , 1998 ; 2001) (Foreman <i>et al.</i> , 2004 ; Sandstrom <i>et al.</i> , 1998) (Cutmore <i>et al.</i> , 2000 ; Astur <i>et al.</i> , 2004)	Hommes = Femmes (Parsons <i>et al.</i> , 2004)

Tableau 4.7 – Principaux résultats expérimentaux concernant les différences hommes / femmes

sont synthétisées dans la section suivante.

4.5 Synthèse

Une série de résultats expérimentaux permettant de faire des hypothèses concernant l'impact des caractéristiques de l'utilisateur sur sa performance en réalité virtuelle vient d'être présentée. Cette revue de la littérature montre que la tâche la plus fréquemment étudiée est la tâche de recherche d'itinéraire (composante cognitive de la navigation). Dans cette recherche, nous nous intéressons aux tâches les moins étudiées : la locomotion et la manipulation.

L'ensemble de ces résultats expérimentaux montre l'impact des capacités spatiales, de la dépendance-indépendance à l'égard du champ, de l'expérience de l'utilisateur et du sexe sur cette performance. Plus précisément, un haut niveau de capacités spatiales, une propension à être indépendant à l'égard du champ, un certain niveau d'expérience en réalité virtuelle ou enfin le fait d'être un homme semblent supporter un haut niveau de performances en réalité virtuelle. Ces conclusions doivent être modulées pour trois raisons.

La première raison est que ces différentes caractéristiques entretiennent des relations étroites et sont fortement inter-corrélées. Ainsi, le sexe semble avoir un impact sur l'ensemble des autres caractéristiques. Les capacités spatiales sont corrélées à la dépendance-indépendance à l'égard du champ *etc.* Ces interdépendances doivent être prises en compte et contrôlées pour étudier les caractéristiques de l'utilisateur. Ainsi, nous n'étudierons pas l'effet du sexe sur la performance, ce facteur étant trop fortement interdépendant des autres facteurs. Il sera contrôlé grâce à une répartition homogène des hommes et des femmes dans notre population de sujets.

La seconde raison qui nous amène à moduler nos conclusions, est que les différentes études que nous avons détaillées ne s'intéressent pas de façon systématique à chaque tâche d'interaction. La majorité des études s'intéresse à la navigation dans sa composante cognitive (la recherche d'itinéraire), quelques études (essentiellement celles de Waller (2000)) se focalisent sur la locomotion, et de rares études s'intéressent à la manipulation (Ogle, 2002 ; Parsons *et al.*, 2004).

Enfin, la troisième raison est que cette approche est peu satisfaisante de notre point de vue. Dans le chapitre précédent (chapitre 3), un modèle de l'utilisateur d'un système informatique illustré (*cf.* figure 3.7, page 59) a été proposé. Les études présentées (et que nous avons recensées) ne s'intéressent pas aux différentes étapes du traitement de l'information telles que nous les avons définies se plaçant davantage dans une approche factorielle des aptitudes humaines. Nous proposons donc de compléter ces études des caractéristiques de l'utilisateur en nous concentrant sur l'impact de chaque étape de traitement de l'information sur chaque tâche en réalité virtuelle.

Les études expérimentales identifiées dans ce chapitre, ont notamment montré l'impact des capacités spatiales sur les performances en locomotion et en recherche d'itinéraire. Par contre, aucun résultat n'a été montré pour la tâche de manipulation, nous pouvons néanmoins supposer que les capacités spatiales devraient influencer la performance en manipulation. Ces capacités spatiales peuvent être considérées comme résultantes de l'activité de la mémoire de travail. Une influence de la mémoire de travail sur la performance en réalité virtuelle peut être supposée (*cf.* tableau 4.8).

Caractéristiques de l'utilisateur	Performances dans les tâches	
	Locomotion	Manipulation
Traitement perceptif	Corrélation positive	Corrélation positive
Mémoire de Travail Verbale	Pas de Corrélation	Pas de Corrélation
Mémoire de Travail Visuo-Spatiale	Corrélation positive	Corrélation positive
Mémoire de Travail - Fonction de Contrôle	Corrélation positive	Corrélation positive
Capacités Spatiales	Corrélation positive	Corrélation positive
Traitement moteur	Corrélation positive	Corrélation positive
Dépendance-indépendance à l'égard du champ	Indépendants > > Dépendants	Indépendants > Dépendants
Expérience de l'utilisateur	Expérimentés > Non expérimentés	Expérimentés > Non expérimentés

Le texte en gras indique que ces résultats ont été confirmé par d'autres auteurs expérimentalement

Tableau 4.8 – *Hypothèses sur l'impact des caractéristiques de l'utilisateur sur la performance*

Quelle que soit la tâche étudiée, ces études expérimentales ne fournissent pas d'indications concernant l'implication du traitement perceptif et moteur, nous proposons néanmoins de les étudier. En effet, nous pouvons supposer qu'interagir avec un environnement virtuel requiert dans un premier temps de le percevoir et dans un dernier temps d'agir sur cet environnement. Les capacités perceptives et motrices devraient donc être impliquées dans l'interaction en réalité virtuelle (*cf.* tableau 4.8).

Cependant, les caractéristiques de l'utilisateur identifiées comme pouvant influencées la performance en réalité virtuelle ne sont pas toutes considérées à travers ce modèle du traitement de l'information comme la dépendance-indépendance à l'égard du champ, le niveau d'expérience (et le sexe que nous faisons le choix de ne pas étudier). Ces deux caractéristiques

correspondent à des types de traitement de l'information différents et à l'utilisation de stratégies différentes. Elles devraient moduler le traitement de l'information et la performance globale d'interaction en réalité virtuelle (*cf.* tableau 4.8).

Nous séparons notre étude en deux axes, le premier concernant l'étude des processus cognitifs de l'utilisateur en nous appuyant directement sur le modèle de l'utilisateur (*cf.* figure 3.7, 59) et le second concernant les caractéristiques plus générales de l'utilisateur modulant la performance : la dépendance-indépendance à l'égard du champ et l'expérience. Selon la littérature, l'expérience de l'utilisateur a été montrée comme modulant la performance en locomotion et en recherche d'itinéraire. Par contre, aucune étude expérimentale ne s'est intéressée à la dépendance-indépendance à l'égard du champ, bien que de nombreux auteurs l'aient cité comme influençant la performance. Concernant la manipulation, une étude a montré l'impact de la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur la performance. Seule, l'expérience n'a pas été étudiée (*cf.* tableau 4.8).

Partie II: Modélisation et Expérimentation

Dans cette seconde partie, les résultats de nos travaux de recherche sont présentés. Nous nous intéresserons à la tâche dans le chapitre 5, et à l'utilisateur dans le chapitre 6.

Concernant la tâche, notre objectif est de proposer des modèles des tâches en réalité virtuelle spécifiant les points clés de l'interaction devant être soutenus lors de la conception d'une application. Dans le chapitre 2, les tâches de manipulation et de navigation ont été définies de manière générale. Ces définitions seront précisées et complétées grâce à une analyse comparative des propriétés géométriques des environnements réels et virtuels et des référentiels spatiaux des utilisateurs dans ces environnements. Cette analyse a pour objectif d'identifier les difficultés rencontrées par un utilisateur pour appréhender un environnement virtuel.

Concernant l'utilisateur, notre objectif est d'étudier expérimentalement les caractéristiques de l'utilisateur influençant la performance dans des tâches de locomotion ou de manipulation. Dans les chapitres 3 et 4, un modèle de l'utilisateur et une revue de la littérature expérimentale ont été proposés. Un certain nombre d'hypothèses ont été présentées concernant l'impact des caractéristiques de l'utilisateur sur la performance en réalité virtuelle. Nous les vérifierons expérimentalement en étudiant les performances des utilisateurs sur différentes interfaces, pour différentes tâches, et en fonction des caractéristiques cognitives (capacités sensorielles, motrices, mnésiques et spatiales) et générales de l'utilisateur (expérience dans la tâche, dépendance-indépendance à l'égard du champ). Enfin, nous concluons dans le chapitre 7 en présentant une synthèse de nos travaux et leurs perspectives d'un point de vue théorique et d'un point de vue appliqué.

CHAPITRE 5

Modélisation de l'Interaction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur les tâches primitives de l'interaction en réalité virtuelle : la manipulation et la locomotion. Au cours du chapitre 2, des définitions de ces deux tâches primitives ont été proposées. Néanmoins, ces définitions nous semblent restrictives, car elles se focalisent uniquement sur les transformations géométriques que doit effectuer un utilisateur : traduire et orienter son point de vue (pour les tâches de locomotion) ou un objet (pour les tâches de manipulation). Ce chapitre a donc pour objectif de les compléter et de proposer une modélisation plus précise de ces tâches.

En étudiant la théorie de l'action de Norman & Draper (1986), nous avons mis en exergue la nécessité pour l'utilisateur de se construire un modèle mental de l'état du système informatique, de la tâche et de son résultat. La réussite dans cette tâche dépend ainsi de la distance entre l'état du système et la représentation qu'en a l'utilisateur. L'objectif du concepteur d'une application doit donc être la réduction de cette distance. Pour y parvenir, Fuchs & Burkhardt (2003) proposent de baser l'interaction sur des métaphores naturelles ou de schèmes sensori-moteurs. L'utilisateur peut ainsi utiliser ses connaissances sensori-motrices acquises en environnement réel pour interagir avec l'environnement virtuel (comme par exemple, utiliser le schème de la marche pour se déplacer ou celui de la préhension pour attraper un objet).

Cependant il n'est pas toujours techniquement possible de se baser sur l'utilisation d'un schème. En effet, en poussant cette conception de Fuchs & Burkhardt à l'extrême, toutes les

applications demandant à l'utilisateur de déplacer son point de vue devraient se baser sur le schème de la marche, de la conduite automobile ou tout autre comportement sensori-moteur préalablement acquis. De plus, selon cette conception, les environnements virtuels devraient être soumis aux contraintes du réel. Or, certaines applications ont justement pour objectif de s'extraire de ces contraintes du réel, telles que par exemple, les applications artistiques ou ludiques.

Dans ce travail de recherche, nous nous focalisons sur deux types de technologies : celles utilisant des écrans d'ordinateur et celles utilisant des murs immersifs. Dans le premier cas, les interacteurs moteurs lourds (tels que des tapis roulants) sont peu pertinents à cause de la taille de l'écran. Dans le second cas, ils peuvent l'être mais uniquement dans le cadre d'application ne requérant pas d'être utilisés simultanément par plusieurs utilisateurs. Dans ces deux configurations, le problème central est l'orientation du point de vue de l'utilisateur, puisque contrairement aux applications utilisant des visiocasques, l'utilisateur doit spécifier l'orientation de son point de vue dans l'environnement virtuel. De plus, nous ne nous plaçons pas dans le cadre d'un type d'application précis ; nos conclusions visent à être valables aussi bien pour des applications de formation et de simulation que pour des applications ludiques ou artistiques.

En conséquences, l'utilisation stricte des schèmes n'est pas toujours possible ou souhaitable et l'orientation du point de vue est une problématique importante. Une piste de réflexion serait de tenter de comprendre comment l'utilisateur appréhende l'environnement virtuel. C'est à dire comment il se représente les conséquences de son interaction avec le système informatique (de ses actions sur l'interacteur) sur l'environnement virtuel. Pour y parvenir, il doit transposer et adapter ses connaissances du monde réel aux environnements virtuels (Morineau, 1996). Plus les différences entre les environnements réel et virtuel seront importantes, plus l'utilisateur aura des difficultés à se représenter de manière cohérente l'état du système. Selon nous, ces difficultés peuvent provenir de deux faits. L'utilisateur doit, d'une part, interagir avec un environnement inconnu, il doit donc s'adapter et d'autre part l'interaction demande une compréhension et une appréhension de l'espace différentes de celles des environnements réels. Le premier point a déjà fait l'objet d'études notamment par Morineau (1996) qui s'est intéressé aux processus cognitifs d'adaptation des utilisateurs lors d'une première immersion dans un environnement virtuel inconnu. Il a montré qu'en environnement virtuel, les utilisateurs basent leurs comportements sur des compétences primaires acquises dans leur enfance et ne font pas appel à toutes leurs compétences. Ainsi, nous avons fait le choix de nous focaliser sur les différences entre les propriétés spatiales des environnements réels et des environnements virtuels.

C'est pourquoi, ce chapitre se divise en trois parties. La première consistera en l'analyse des propriétés des environnements réels et virtuels et de leurs relations avec les référentiels spatiaux des utilisateurs. Cette analyse permettra de proposer, dans la deuxième partie, une

extension des modèles hiérarchiques de la locomotion et de la manipulation. En troisième partie, l'étude de différentes interfaces (existantes ou construites dans le cadre de ce travail) permettra de valider cette démarche.

5.1 *Propriétés des environnements et référentiels spatiaux*

5.1.1 *Environnements réels*

Pour se repérer dans un environnement réel, un individu dispose de deux types de référence spatiale : les premières contraignent ses mouvements locomoteurs ; les secondes lui permettent d'interpréter ses déplacements. En conséquence, dans cette section, nous définissons successivement ces deux types de référence spatiale.

Contraintes sur le déplacement : référence gravitationnelle et référence horizontale

En environnement réel, les déplacements d'un individu sont contraints par la gravité. Ainsi, il lui est impossible de se déplacer autrement que sur un support (sur le sol). Il en est de même pour la manipulation ou le déplacement d'un objet puisqu'il est également soumis aux lois de la pesanteur. Un individu évolue donc principalement sur une *référence horizontale*¹ (Ohlmann, 1990).

Pour appréhender cette référence, certains auteurs (Grüsser, 1983 ; Rybarczyk, 2004) ont proposé que les individus segmentaient l'espace en fonction de leurs limitations sensorielles et motrices. Ainsi, trois espaces sphériques et concentriques gravitant autour de l'individu peuvent être distingués : *l'espace personnel*, *l'espace extra-personnel* et *l'espace lointain*. L'espace personnel peut se définir comme la zone qui s'étend depuis le pourtour immédiat de l'observateur jusqu'à une limite située au niveau de l'extension maximale du bras (Hall, 1966 ; Sommer, 1969). Cet espace correspond à la zone dans laquelle un individu peut manipuler des objets sans avoir à engendrer une activité locomotrice (*cf.* figure 5.1, configuration 1). L'espace extra-personnel est l'espace dans lequel l'individu se déplace rapidement, communique verbalement avec autrui et échange des objets. L'espace lointain est celui qui se situe à plus de 30 mètres. L'individu ne peut pas manipuler les objets observés dans cet espace et le déplacement vers ceux-ci est coûteux en temps et en énergie motrice (*cf.* figure 5.1, configuration 2).

1. La référence horizontale se définit par le plan formé par l'axe horizontal et celui de la profondeur.

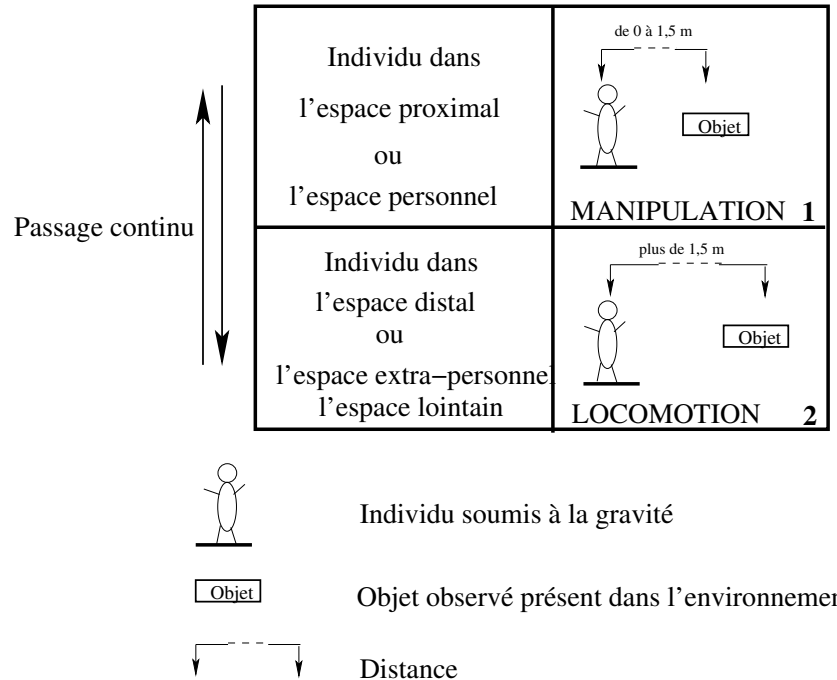


Figure 5.1 – Représentation schématique d'un individu en environnement réel

Cette théorie de l'espace est, en partie, congruente avec une autre théorie issue de la neuropsychologie résultant de l'observation de doubles dissociations² chez des patients cérébro-lésés entre *l'espace proximal* et *l'espace distal*. Ainsi, de nombreux sujets montrent une incapacité à se représenter consciemment un secteur d'espace situé à proximité alors que d'autres ont des difficultés à se représenter un espace lointain (Halligan & Marshall, 1991 ; Cowey *et al.*, 1994 ; 1999 ; Farnè *et al.*, 1999). Les travaux de Cowey *et al.* (1999) suggèrent que la frontière entre l'espace proximal et l'espace distal se situe sur une zone correspondant grossièrement à la longueur maximale du bras (soit environ 1,5 mètres). Le passage d'un espace à l'autre est continu et peu problématique pour un individu (*cf.* figure 5.1), il résulte uniquement du déplacement locomoteur de l'observateur par rapport à l'objet observé. L'espace personnel (de la manipulation) peut donc être assimilé à l'espace proximal, de même l'espace extra-personnel et l'espace lointain (de la locomotion) sont assimilables à l'espace distal (*cf.* figure 5.1).

Pour affiner ces remarques, nous pouvons noter, que sans outillage, les déplacements d'un individu ne nécessitent pas le contrôle complet des six degrés de liberté. En effet, les déplacements d'un humain sont contraints par les limitations biomécaniques de son corps et/ou de sa tête. Ainsi, un individu (debout sur ses pieds) peut effectuer uniquement des rotations

2. Nous rappelons que pour conclure en terme de double dissociation, il faut démontrer qu'un symptôme A apparaît lors de la lésion d'une structure S1 mais non lors de celle de S2 et que le symptôme B apparaît lors de la lésion de la structure S2 mais pas de S1.

quelconques par rapport à l'axe de la verticale, alors que les rotations sur le plan horizontal lui sont impossibles.

Nous poursuivons cette étude de l'individu en environnement réel en nous demandant comment ce dernier interprète ses déplacements.

Interprétation des déplacements : référence égocentrique et référence exocentrique

En environnement réel, pour interpréter son déplacement, un individu doit s'en construire un modèle mental. Pour cela, il utilise soit un *référentiel égocentrique* dans lequel il se considère comme l'origine du système (à *ma* droite, devant *moi*), soit un *référentiel exocentrique* (appelé également *allocentrique*, *objectif*, *géocentrique*) dans lequel les objets sont localisés par rapport à des repères extérieurs présents dans l'environnement (en face de la *fenêtre*, sous la *table*) (Hatwell, 1990). Une représentation schématique de ces deux référentiels est présentée sur la figure 5.2.

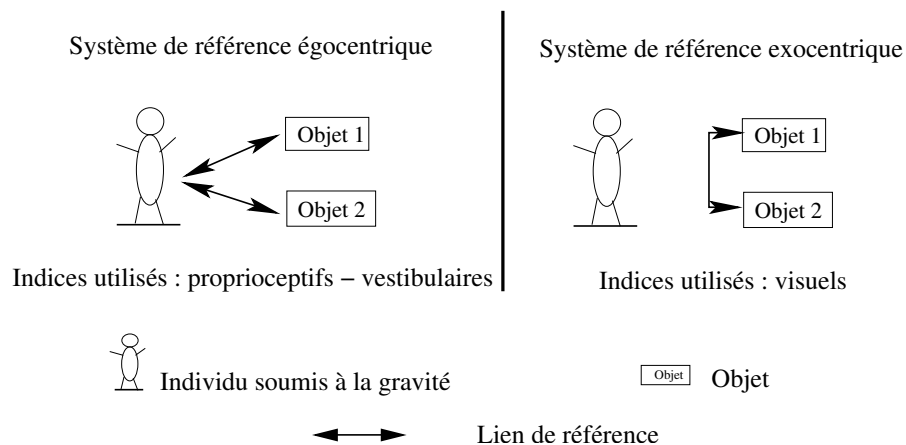


Figure 5.2 – *Référence égocentrique vs. référence exocentrique*

La référence égocentrique se base sur des informations proprioceptives et vestibulaires ce qui signifie que l'individu utilise les informations provenant de son corps pour se repérer et interpréter ses déplacements. L'utilisation d'une référence exocentrique implique que l'individu utilise la position de repères visuels présents dans l'environnement pour se localiser (Huteau, 1987) (*cf.* figure 5.2). Cependant, ces deux références ne doivent pas être considérées comme totalement indépendantes puisque les indices extérieurs servant à la localisation exocentrique peuvent eux mêmes être localisés par l'individu sur un mode égocentrique (Hatwell, 1990).

Les individus utilisent préférentiellement l'un ou l'autre de ces systèmes de référence et cela de façon dépendante vis à vis de la tâche et des différences inter-individuelles telles que l'expérience personnelle ou la dépendance-indépendance à l'égard du champ (Wohwill, 1981 ;

Ohlmann, 1990). La tâche d'orientation spatiale de Guilford & Zimmerman (1989) nécessite, par exemple, l'utilisation de connaissances égocentriques, elle sera donc réalisée plus efficacement en utilisant une référence de ce type tandis que la tâche de rotation mentale de Vandenberg & Kuse (1978) demande l'utilisation d'une référence exocentrique. De plus, certains individus, les indépendants à l'égard du champ, privilégient les références égocentriques tandis que d'autres, les dépendants à l'égard du champ, privilégient les références exocentrique (*cf.* chapitre 4).

En résumé, en environnement réel, le référentiel gravitationnel et horizontal contraint le déplacement d'un individu et la manipulation des objets. Alors que les systèmes de référence égocentrique et exocentrique lui permettent d'interpréter ses déplacements. Par contre, en environnement virtuel, ces différents référentiels ne sont pas systématiquement définis. C'est pourquoi, nous poursuivons notre réflexion en étudiant les spécificités des environnements virtuels.

5.1.2 Environnements virtuels

Nous nous concentrons maintenant sur les environnements virtuels afin d'identifier comment les individus s'y repèrent. Deux points seront traités : le premier concerne les spécificités de ces environnements ; le second recense les définitions des termes égocentrique et exocentrique apparaissant dans la littérature sur la réalité virtuelle. Nous montrerons que ces définitions ne se réfèrent pas nécessairement à un système d'interprétation des déplacements comme en environnement réel. En conclusion, une nouvelle définition de ces termes (dans le cadre de la réalité virtuelle) sera proposée ainsi qu'une représentation schématique de l'utilisateur dans ces environnements.

Propriétés des environnements virtuels

Un environnement virtuel peut être assimilé à un graphe hiérarchique d'objets tridimensionnels³. Ainsi, par exemple, un environnement virtuel urbain, tel que celui illustré sur la figure 5.3, se compose de divers objets : des maisons, des parcs *etc.* Ces objets étant eux mêmes composés de sous-objets : une maison est composée d'un toit et de murs ; un parc, d'arbres et de bancs publics *etc.* Chaque nœud de ce graphe hiérarchique peut faire l'objet de transformations géométriques (translations et rotations) sur les trois dimensions. Ainsi, il est techniquement possible d'effectuer des transformations géométriques aussi bien sur la scène dans sa totalité (la ville) que sur les objets (l'arbre du parc).

3. Tous les environnements virtuels ne sont pas nécessairement totalement décomposables de façon hiérarchique, nous reviendrons sur ce point ultérieurement.

Pour visualiser la scène et les objets qui la compose, le concepteur de l'application doit intégrer un objet particulier : la caméra⁴. Cette caméra peut être assimilée au point de vue de l'utilisateur, c'est-à-dire à ce qu'il percevrait de l'environnement s'il était lui même physiquement présent dans celui-ci. Notons que, les mêmes transformations géométriques que celles appliquées aux autres objets peuvent être appliquées à la caméra.

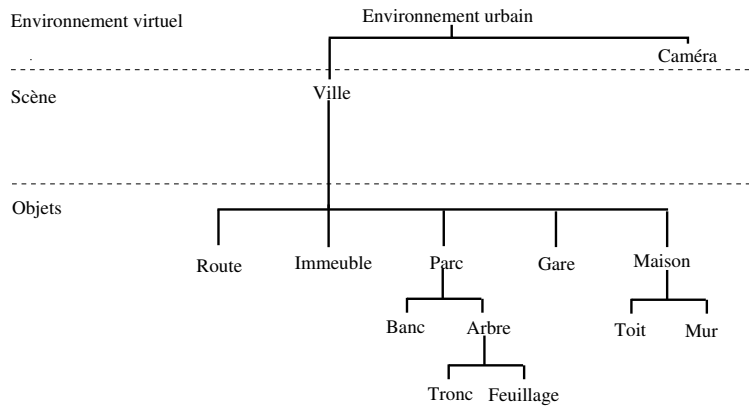


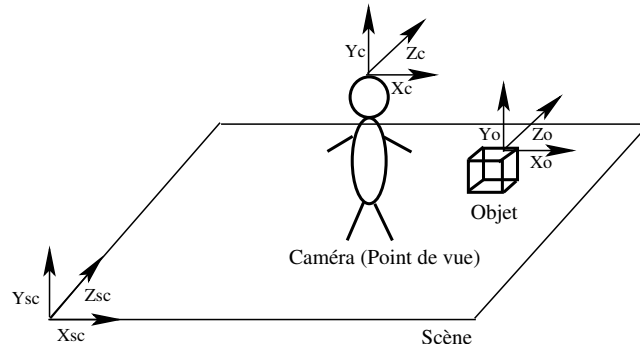
Figure 5.3 – Exemple de graphe hiérarchique représentant un environnement virtuel urbain

D'après cette définition géométrique des environnements virtuels, trois catégories d'éléments peuvent être distinguées : la scène tridimensionnelle, les différents objets constituant cette scène et enfin la caméra. Dans la suite de ce document, le terme d'*objet* définira un objet non décomposable (c'est-à-dire une feuille du graphe hiérarchique représentant l'environnement virtuel). Des transformations ne pourront donc pas être effectuées sur des sous-parties de cet objet et le point de vue ne pourra pas être à l'intérieur de cet objet ce qui signifie que le point de vue de l'utilisateur sera bloqué par collision avec les limites de l'objet. Chacun de ces éléments (par extension, chaque objet du graphe hiérarchique) peut être considéré comme le centre d'un repère géométrique tridimensionnel orthonormé⁵ comme l'illustre la figure 5.4.

Techniquement, si les interacteurs utilisés ne sont pas considérés, il est possible d'effectuer des translations et des rotations quelconques sur ces différents repères. Il est important de noter que le choix d'un repère particulier pour effectuer des transformations ne conditionne pas le résultat. En effet, tout point de vue peut être atteint par des transformations effectuées sur la caméra ou sur la scène.

4. Une source lumineuse doit également être intégrée pour pouvoir visualiser l'environnement virtuel.

5. Un repère tridimensionnel est constitué d'un point O et d'un triplet de vecteurs i, j, k tel qu'aucun des trois vecteurs ne soit une combinaison linéaire des deux autres. O est l'origine et (i, j, k) la base. $(0, i, j, k)$ peut se situer n'importe où dans l'espace et plusieurs repères peuvent cohabiter. Classiquement en réalité virtuelle, les bases utilisées sont orthonormées, c'est-à-dire que les différents vecteurs sont de même norme et que les vecteurs sont deux à deux orthogonaux.



Le triplet (X_{sc}, Y_{sc}, Z_{sc}) définit le repère géométrique de la scène (souvent nommé repère du monde). Le triplet (X_c, Y_c, Z_c) définit le repère géométrique de la caméra ou du point de vue. Le triplet (X_o, Y_o, Z_o) définit le repère géométrique d'un objet non décomposable. X représente l'axe horizontal, Y l'axe vertical et Z l'axe de la profondeur. Les trois repères géométriques ne sont pas nécessairement alignés. Ces notations seront utilisées dans l'ensemble de ce document.

Figure 5.4 – *Les différents repères géométriques dans un environnement virtuel*

Cependant, il est fréquent d'ajouter des contraintes sur certaines transformations géométriques. Ces contraintes peuvent interdire la manipulation de certains nœuds du graphe hiérarchique ou interdire certains déplacements de la caméra. Par exemple, dans une application où l'objectif est de visiter une ville virtuelle, les transformations sur les murs des maisons peuvent être interdites. Ces contraintes peuvent également provenir de l'interacteur utilisé. Par exemple, si c'est un capteur de position posé sur la tête de l'utilisateur, les transformations géométriques seront contraintes par les déplacements possibles de la tête de cet utilisateur.

Il apparaît donc clairement qu'en environnement réel, les déplacements des individus sont contraints par les forces gravitationnelles (*cf.* tableau 5.1) qui imposent des limitations dans les translations sur l'axe vertical, par contre dans un environnement virtuel, ces translations ne sont plus nécessairement contraintes. De même, les rotations, ne sont plus contraintes par les limitations biomécaniques humaines comme en environnement réel. Ainsi, il est techniquement possible d'effectuer des rotations du point de vue de l'utilisateur sur 360 degrés sur les trois dimensions (*cf.* tableau 5.1).

Transformations Géométriques		Contraintes en environnement réel	Contraintes en environnement virtuel
Translations	axe de la verticale	Contrainte par la gravité	Pas de contrainte
	axe de l'horizontal	Pas de contrainte	
	axe de la profondeur	Pas de contrainte	
Rotations	axe de la verticale	Pas de contrainte	Pas de contrainte
	axe de l'horizontal	Contraintes biomécaniques	
	axe de la profondeur	Contraintes biomécaniques	

Tableau 5.1 – *Contraintes sur les déplacements en environnements réel et virtuel*

Cette absence de contrainte est vraie pour les transformations effectuées sur la caméra,

mais elle l'est également pour celles effectuées sur les objets ou la scène. Ainsi, les objets ne sont plus nécessairement soumis aux lois de la pesanteur et la scène dans sa totalité peut subir des transformations sur les 6 degrés de liberté.

Nous venons de montrer l'absence (possible) de contraintes en environnement virtuel en comparaison de celles présentes en environnement réel. Nous souhaitons maintenant comprendre la façon dont un individu appréhende l'espace dans un environnement virtuel en revenant sur les définitions des systèmes de référence égocentrique et exocentrique.

Référence égocentrique vs. exocentrique

Les termes *égocentrique* et *exocentrique* (et leurs dérivés) sont fréquemment utilisés dans le cadre de l'étude des environnements virtuels. Cependant, il convient d'être prudent car les définitions utilisées ne sont pas nécessairement congruentes avec celles que proposées précédemment dans le cadre des environnements réels (sous-section 5.1.1). Deux définitions de ces termes vont particulièrement nous intéresser. La première fait référence à la position du point de vue dans l'environnement virtuel (intérieur ou extérieur), la seconde au repère géométrique sur lequel sont effectuées les transformations (la caméra ou la scène). Nous concluons en adaptant la définition de ces termes aux environnements virtuels

- Certains auteurs (Poupyrev *et al.*, 1998 ; Goerger *et al.*, 1998 ; Salzman *et al.*, 1999a) utilisent les termes de *vue égocentrique* et de *vue exocentrique*. Une vue égocentrique fournit une vue de la scène de l'intérieur ce qui signifie que la caméra est à l'intérieur de la scène (*cf.* figure 5.5 ; configurations 1, 2 et 3). Une vue exocentrique, quant à elle, fournit une vue de cette scène de l'extérieur, la caméra est donc à l'extérieur (*cf.* figure 5.5 ; configurations 4, 5 et 6). La notion d'intérieur et d'extérieur est subjective, le passage entre ces deux vues étant continu. Le point de vue est habituellement considéré comme extérieur quand la totalité de la scène peut être visualisée simultanément. Dans la suite de ce travail, nous n'emploierons pas les termes de vue égocentrique ou exocentrique qui peuvent provoquer des confusions. Nous préférons employer le terme de *référentiel du point de vue* (*cf.* figure 5.5).

Cette définition d'un référentiel en fonction de la position du point de vue en environnement virtuel peut être rapprochée de la segmentation de l'espace réel en terme de distance entre un individu et un objet observé. Cependant, en environnement réel, cette distance est définie dans la référence horizontale, par contre, en environnement virtuel, le point de vue peut changer de position selon cette référence horizontale, mais également selon une référence frontale⁶. Ainsi, le point de vue peut être au dessus de la scène, en dessous, en avant, derrière *etc.* Il en résulte que lorsque l'utilisateur se trouve à l'extérieur de la scène, il est dans une configuration spatiale inhabituelle et non naturelle.

6. La référence frontale est le plan formé par l'axe horizontal et l'axe de la verticale

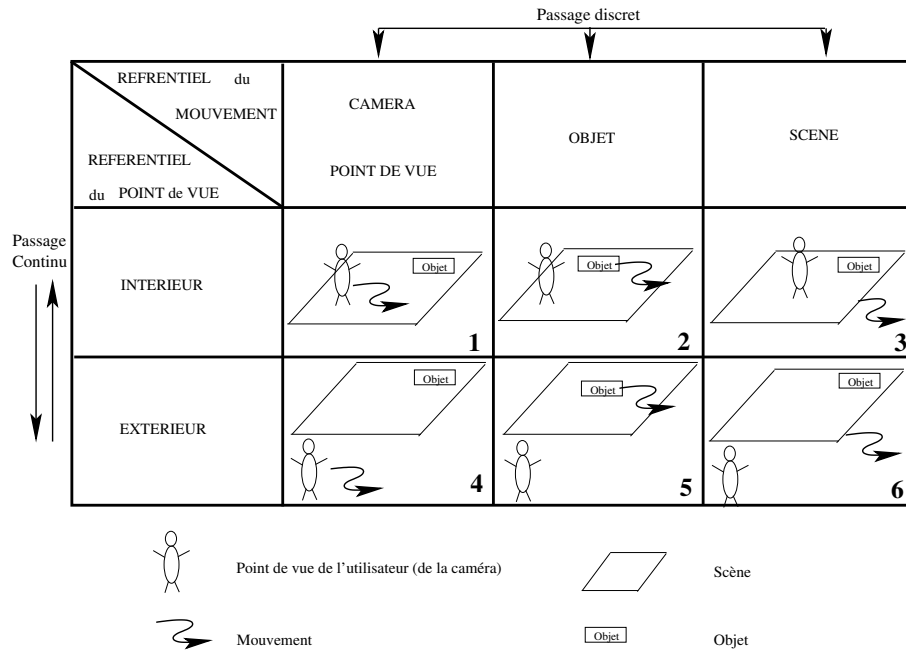


Figure 5.5 – Représentation schématique d'un utilisateur en environnement virtuel

• D'autres auteurs (Bowman *et al.*, 2000 ; Swan *et al.*, 2003) utilisent ces termes *égocentrique* et *exocentrique* différemment. Ainsi, selon Bowman *et al.* et Swan *et al.*, le référentiel égocentrique peut se définir comme le référentiel dans lequel la position, l'orientation et les mouvements des objets respectent la position et l'orientation du point de vue de l'utilisateur dans l'environnement virtuel tandis que le référentiel exocentrique peut se définir comme un référentiel dans lequel la position, l'orientation et les mouvements sont définis dans des coordonnées externes à celles du point de vue. Ainsi, dans le cadre d'un référentiel égocentrique, le point de vue de l'utilisateur se déplace dans la scène tandis que dans le cadre d'un référentiel exocentrique, la scène se déplace autour du point de vue (Swan *et al.*, 2003). Dans le premier cas, les transformations géométriques sont effectuées sur la caméra (*cf.* figure 5.5 ; configurations 1 et 4) tandis que dans le second les transformations sont effectuées sur les objets (*cf.* figure 5.5 ; configurations 2 et 5) ou sur la scène (*cf.* figure 5.5 ; configurations 3 et 6). Ces définitions font référence aux entités (caméra, objets, scène) pouvant être manipulés, subir un mouvement, nous préférons donc utiliser le terme de *référentiel du mouvement*. Le passage entre les différents référentiels du mouvement est discret. En environnement réel, un individu peut uniquement manipuler son point de vue et les objets quand ils sont de taille réduite. En revenant à notre exemple initial concernant l'environnement virtuel, un utilisateur peut potentiellement manipuler la ville dans sa globalité, ce qui est impossible dans un environnement urbain réel. Ainsi, là encore, l'utilisateur se trouve confronté à une situation d'interaction inhabituelle.

Ces différentes définitions des termes *égocentrique* et *exocentrique* nous ont permis de définir deux référentiels : *un référentiel du point de vue* et *un référentiel du mouvement*. Il apparaît que les définitions de ces termes ne sont pas concordantes avec celles développées pour les environnements réels (*cf.* sous-section 5.1.1), puisqu'elles font directement référence au positionnement du point de vue ou à des transformations géométriques et non pas à l'interprétation par l'individu de ses déplacements.

C'est pourquoi nous proposons de conserver ces termes pour définir comment un individu interprète ses déplacements dans un environnement virtuel. Ainsi, un utilisateur se basant sur *un système de référence égocentrique* utilisera son point de vue dans l'environnement (donc la position et l'orientation de la caméra) comme origine du système pour interpréter ses déplacements, tandis qu'un utilisateur se basant sur *un système de référence exocentrique* utilisera les objets et la scène comme référence pour interpréter ses déplacements dans l'environnement virtuel (*cf.* figure 5.6).

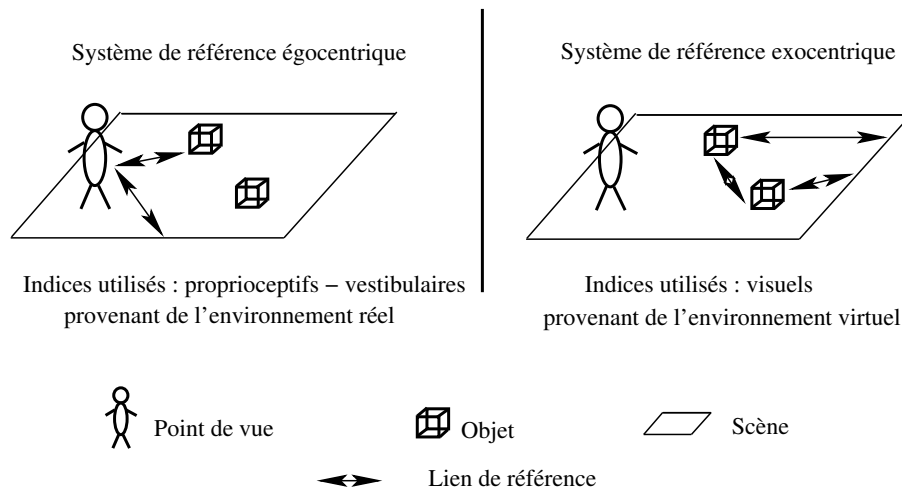


Figure 5.6 – *Systèmes de référence égocentrique et exocentrique en environnement virtuel*

En environnement réel, la définition d'un système de référence dépend également des indices utilisés par l'utilisateur pour se repérer. Ainsi, les individus utilisant un système de référence égocentrique se basent sur des indices proprioceptifs et vestibulaires, tandis que les individus utilisant un système de référence exocentrique se basent essentiellement sur des indices visuels. En réalité virtuelle, peu d'applications offrent un retour proprioceptif et vestibulaire satisfaisant. Dans la majorité des applications, l'utilisateur ne dispose que de ses actions motrices sur l'interacteur et d'indices visuels pour interpréter ses déplacements dans l'environnement virtuel (*cf.* figure 5.6). Ainsi, l'utilisateur dispose d'indices proprioceptifs et vestibulaires provenant du monde réel et d'indices visuels provenant du monde virtuel. Les sujets utilisant un système de référence égocentrique, vont utiliser des indices provenant du

monde réel tandis que les sujets utilisant une référence exocentrique vont utiliser des indices du monde virtuel. Les premiers disposant d'indices proprioceptifs et vestibulaires sur leur position seront moins soumis à la désorientation, leurs références restant fixes. Par contre, les seconds seront sensibles à toutes modifications effectuées sur la visualisation de l'environnement virtuel, celle-ci étant leur référence.

Cette remarque peut être rapprocher à la problématique des incohérences sensori-motrices. En effet, dans de nombreuses applications, les informations visuelles provenant de l'environnement virtuel ne seront pas en accord avec les informations proprioceptives et vestibulaires provenant de l'environnement réel. Ainsi, selon les stratégies d'appréhension de l'environnement utilisées par les utilisateurs (égocentrique *vs.* exocentrique), les incohérences sensori-motrices ne seront pas similaires. Les individus égocentriques risquent interpréter les informations visuelles comme incohérentes en fonction des informations proprioceptives et vestibulaires tandis que les individus exocentriques risquent interpréter ces dernières comme incohérentes par rapport aux informations visuelles. Bien que cette problématique échappe à l'objet de cette étude, nous pouvons néanmoins noter que pour pallier à ces incohérences sensori-motrices, il est primordial de renseigner aussi bien le système visuel que les systèmes proprioceptifs et vestibulaires.

De plus, comme en environnement réel, l'utilisation préférentielle d'un système de référence devrait dépendre des caractéristiques de la tâche et de l'utilisateur. L'adéquation entre la tâche et le système de référence peut nous pousser à faire l'hypothèse que les transformations sur le point de vue de l'utilisateur pourraient être interprétées par l'utilisateur dans un référentiel égocentrique, tandis que les transformations sur la scène (ou sur les objets) pourraient être interprétées dans un référentiel exocentrique. Cependant, le système de référence dépend également des préférences des utilisateurs, il est donc possible, que ce dernier effectue des transformations sur le point de vue et l'interprète en terme de déplacement de la scène ou inversement.

Prenons l'exemple concret d'un déplacement dans l'environnement virtuel urbain illustré sur la figure 5.7 A, la locomotion a été programmée pour que le déplacement de la souris sur la gauche implique un déplacement du point de vue dans l'environnement virtuel vers la gauche. Le retour visuel, illustré sur la figure 5.7 B, perçu par l'utilisateur peut être interprété de deux façons :

1. le point de vue s'est déplacé sur la gauche ;
2. la scène s'est déplacée vers la droite.

A priori, les utilisateurs ayant un système de référence égocentrique devrait interpréter le déplacement de la première façon tandis que les autres (utilisant une référence exocentrique) devrait l'interpréter de la seconde façon. Il en résulte que l'interaction pose problème à ces

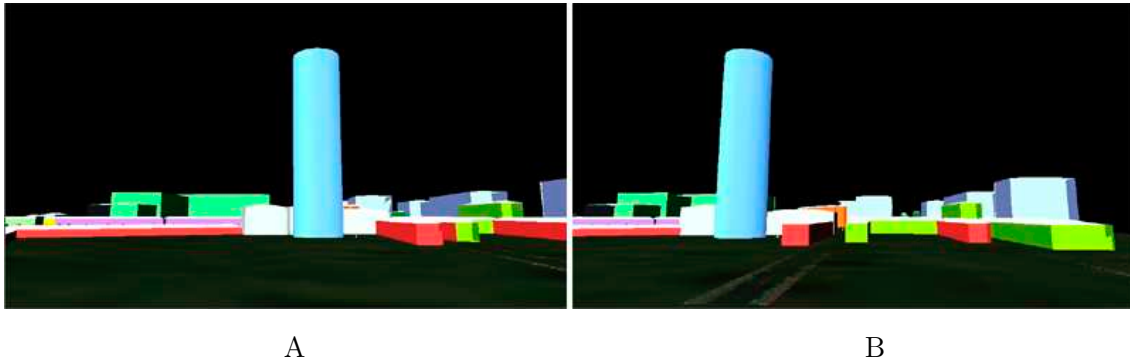


Figure 5.7 – *Déplacement du point de vue ou déplacement de l'environnement ?*

derniers puisqu'ils déplacent la souris vers la gauche et perçoivent un déplacement de la scène vers la droite. L'état final du système est en désaccord avec leur modèle mental de la situation. Par contre, pour les sujets ayant un système de référence égocentrique, le déplacement de la souris est congruent avec le déplacement du point de vue. Cette problématique ne se pose pas en environnement réel, puisque l'individu dispose d'informations vestibulaires et proprioceptives l'informant de son propre déplacement ce qui est rarement le cas en environnement virtuel.

La tâche de manipulation d'un objet ou d'une scène est moins problématique. En effet, l'objet ou la scène sont attachés au déplacement de la souris. Ainsi un déplacement vers la droite de la souris implique un déplacement vers la droite de la scène. Ce mode de déplacement est en accord avec le système de référence exocentrique. Les utilisateurs ayant un système de référence égocentrique sont actifs dans la perception et aptes à utiliser aisément les deux systèmes de référence (Huteau, 1987). Ils n'ont donc pas de difficulté à interpréter ce déplacement.

La principale conclusion de cet exemple est qu'une application doit soutenir la mise en place par l'utilisateur du système de référence correspondant à la tâche qu'il doit réaliser (notamment dans le cas de la locomotion). Notons qu'une seconde solution peut consister à proposer les deux modes d'interaction de façon conjointe afin que l'utilisateur puisse choisir de manipuler le point de vue ou la scène.

Synthèse

Grâce à cette étude des spécificités des environnements virtuels, nous avons identifié six configurations spatiales différentes dans lesquelles un utilisateur peut se trouver (*cf.* figure 5.5). Chacune de ces configurations peut être interprétée par l'utilisateur avec un système de référence égocentrique ou un système de référence exocentrique. La majorité des configurations (configurations 3, 4, 5, 6 dans la figure 5.5) disponibles en environnement virtuel n'existent pas

en environnement réel. En environnement réel, un individu ne peut pas manipuler le monde qui l'entoure, alors qu'il peut le manipuler en environnement virtuel.

Pour s'adapter aux environnements virtuels, les utilisateurs vont adapter leurs connaissances du monde réel aux environnements virtuels. La compréhension spatiale des environnements virtuels peut soutenir cette adaptation. Dans cette optique, deux types de solutions existent : ajouter des contraintes sur l'interaction (toutes les applications ne nécessitent pas toutes les configurations) ou proposer des aides cognitives à l'utilisateur (par exemple grâce à un retour haptique).

Dans la section suivante, nous utilisons cette représentation de l'utilisateur en environnement virtuel pour proposer des extensions aux modèles hiérarchiques des tâches de locomotion et de manipulation introduits dans le chapitre 2. Pour chaque tâche, nous cherchons à identifier les points de l'interaction posant des difficultés à l'utilisateur.

5.2 Proposition d'un modèle de l'interaction

La représentation de l'utilisateur définie précédemment met en avant la multiplicité des configurations spatiales en environnement virtuel (6 configurations) par rapport à celles en environnement réel (2 configurations). Cependant, ces différentes configurations ne permettent pas de définir les tâches que peut réaliser l'utilisateur. Selon les modèles hiérarchiques des tâches de manipulation et de locomotion proposés dans le chapitre 2, la tâche de locomotion nécessite l'orientation et le positionnement du point de vue de l'utilisateur (*cf.* figure 2.7, page 38) tandis que la tâche de manipulation demande l'orientation et le positionnement d'un objet (*cf.* figure 2.5, page 35). Une scène tridimensionnelle est un graphe hiérarchique d'objets tridimensionnels et peut donc être considérée comme un objet particulier. Nous estimons que lorsque les transformations géométriques sont effectuées dans le repère du point de vue, il s'agit d'une tâche de locomotion, tandis que lorsque les transformations géométriques sont effectuées dans le repère de l'objet ou de la scène, il s'agit de tâches de manipulation. Cette classification n'est pas triviale car certains auteurs proposent de considérer les transformations géométriques sur la scène comme une métaphore de navigation particulière : *scène dans la main*⁷ (Ware, 2000)⁸. La représentation d'un utilisateur en environnement virtuel peut donc être complétée (*cf.* figure 5.8) en précisant les différentes tâches qu'il peut réaliser. Ce modèle met en exergue deux configurations de locomotion et quatre de manipulation. Nous les détaillons succinctement et proposons de compléter les modèles hiérarchiques de ces tâches. L'objectif est d'identifier les points clés pouvant poser des difficultés à l'utilisateur afin que suivant les applications considérées, des contraintes ou des aides lui soient proposées.

7. Cette métaphore est connue sous le terme anglo-saxon *scene-in-hand*.

8. Nous reviendrons ultérieurement sur les difficultés posées par ce type d'interaction

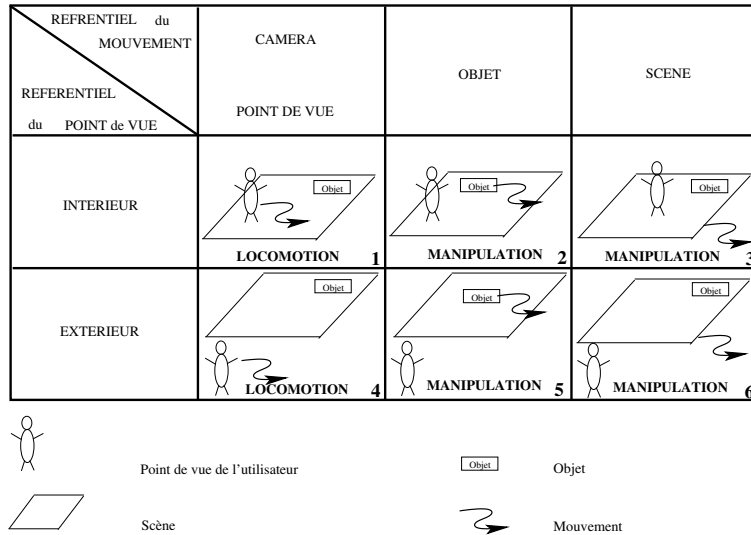


Figure 5.8 – Tâches réalisées par l'utilisateur pour chaque configuration

5.2.1 La locomotion

La locomotion consiste à orienter et à positionner le point de vue de l'utilisateur. Il doit donc appliquer des transformations géométriques (translations et rotations) sur la caméra afin de spécifier sa position et son orientation. Selon la figure 5.8, le point de vue peut être soit à l'intérieur de la scène (configuration 1), soit à l'extérieur (configuration 4). Dans le premier cas, le déplacement du point de vue peut être assimilé à la marche en environnement réel. Dans le second cas, il ne s'apparente à aucun déplacement naturel pour un humain. Il peut être comparé au vol d'un oiseau ou d'un avion autour de la scène. Cette comparaison doit être poussée à l'extrême en considérant que l'oiseau ou l'avion peut se situer en dessous, au dessus, en arrière, en avant de la scène. L'utilisateur peut donc se trouver dans des situations où il ne perçoit plus la scène tridimensionnelle (celle-ci étant au dessus ou en arrière de son point de vue). Bien que cette interaction ne soit pas naturelle, elle n'est pas nécessairement problématique pour l'utilisateur. En effet la principale différence avec le réel est l'absence de référence gravitationnelle. Pour soutenir l'interaction, il peut néanmoins être pertinent, en fonction de l'application, d'ajouter des contraintes de gravité ou de restriction des déplacements. Une deuxième solution peut être de proposer des aides à l'utilisateur. Par exemple, une représentation graphique pourrait indiquer à l'utilisateur la position relative de son point de vue et de la scène. Cette représentation pourrait être affichée dans un coin de la surface de visualisation. Un exemple⁹ est présenté sur la figure 5.9.

9. Aucune étude n'a été menée sur cette représentation graphique, elle est présentée uniquement pour illustrer nos propos.

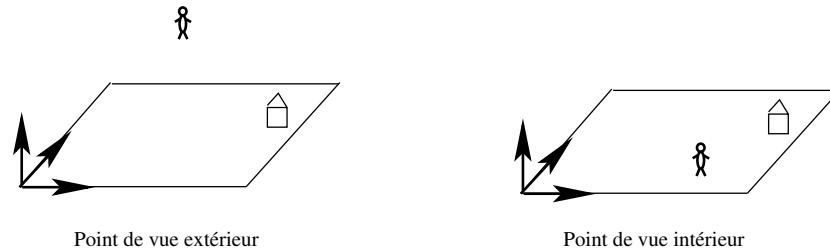


Figure 5.9 – Exemple d'aide graphique pour repérer la position du point de vue

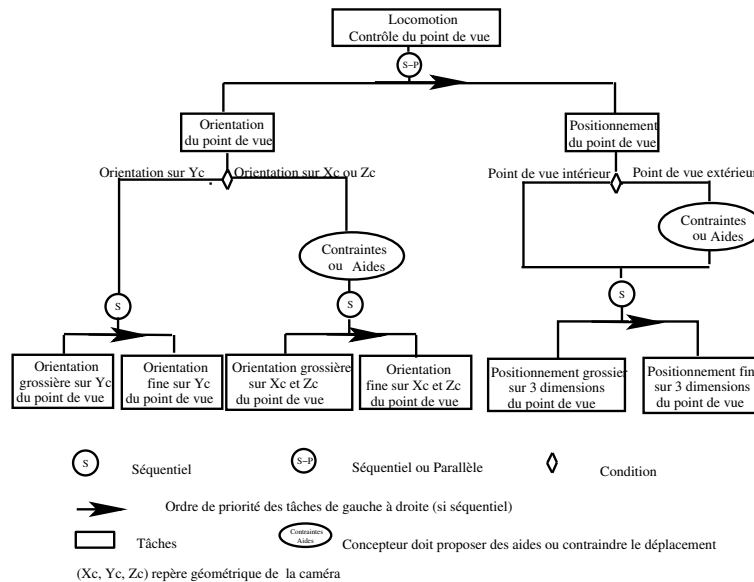
Nous pouvons remarquer que dans le cas où le point de vue de l'utilisateur est contraint à l'intérieur de la scène, l'utilisateur peut être informé de sa position courante grâce à une carte bidimensionnelle comme le proposent de nombreux auteurs (Darken & Sibert, 1993 ; 1996). Par contre, si le point de vue peut être extérieur à la scène, l'utilisateur doit être informé de sa position courante avec une représentation tridimensionnelle afin qu'il puisse se localiser par rapport à la scène.

De plus, dans ces deux configurations de locomotion, l'utilisateur peut théoriquement orienter son point de vue sur 360 degrés sur les trois dimensions. Le point de vue peut donc se retrouver dans des orientations non naturelles. La solution peut être de contraindre son orientation en fonction des limitations biomécaniques humaines (par exemple en contraignant les rotations à un angle de 45 à 90 degrés sur l'axe de l'horizontal et en interdisant les rotations sur l'axe de la profondeur). L'ajout de ces contraintes vise à maintenir une cohérence spatiale entre les environnements réels et virtuels. Cependant, elles entraînent une minimisation drastique des possibilités d'interaction offertes par la réalité virtuelle. Comme précédemment, l'ajout d'aides peut être une solution alternative. Cette aide peut être une représentation du corps de l'utilisateur dans l'environnement virtuel (un avatar) ou une représentation graphique du même type que celles proposées précédemment. Il est également possible de fournir un retour sensoriel à l'utilisateur lui permettant de connaître son orientation. Le *CAT* que nous présenterons en détail dans la section 5.3 utilise un retour haptique passif¹⁰ pour informer l'utilisateur de son orientation.

En résumé, le modèle hiérarchique de la tâche de locomotion (*cf.* figure 2.7, page 38) peut être complété en mentionnant les points clés problématiques sur lesquels un concepteur devra se focaliser pour soutenir une interaction efficace (*cf.* figure 5.10). Ces problèmes, à notre connaissance, ont été peu soulevés dans la littérature ou du moins pas en ces termes. Plusieurs raisons peuvent l'expliquer. La première est que la majorité des travaux utilisent des visio-casques, le déplacement et l'orientation du point de vue sont alors naturellement contraints

¹⁰. Le retour haptique passif repose uniquement sur le toucher de l'utilisateur et ne fait pas intervenir de retour d'effort ; ce terme sera défini plus précisément en introduisant le *CAT*.

par la position et l'orientation du corps dans l'environnement réel. Une autre raison est que la réflexion est souvent centrée sur les mouvements des utilisateurs dans l'environnement virtuel mais pas nécessairement sur le lien avec les mouvements effectués dans l'environnement réel. Enfin, la majorité des travaux en réalité virtuelle s'intéresse à la tâche de navigation dans sa globalité, plus particulièrement à la recherche d'itinéraire. Ces travaux étudient la construction par l'utilisateur d'une carte cognitive de l'environnement virtuel et ne considèrent pas nécessairement la première étape qui est l'intégration et la compréhension du déplacement courant effectué. Dans la section suivante, une démarche similaire est proposée pour la manipulation.



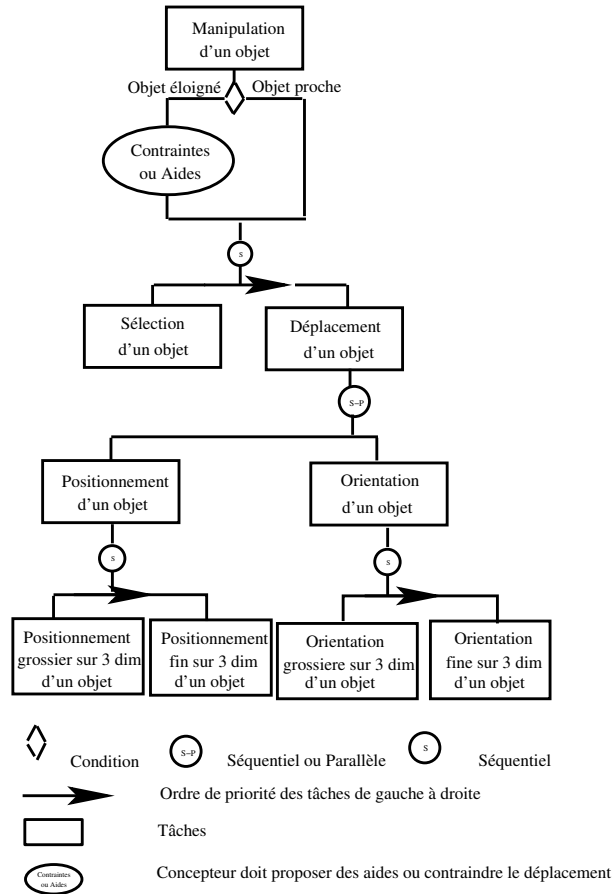
La tâche d'orientation doit être réalisée avant celle de positionnement. Les sous-tâches de déplacement (positionnement et orientation) sont réalisées de façon séquentielle ou parallèle en fonction du dispositif technique utilisé. S'il permet l'utilisation conjointe des six degrés de liberté, alors les sous-tâches peuvent être réalisées en parallèles, sinon elles sont réalisées séquentiellement.

Figure 5.10 – Modélisation de la tâche de locomotion identifiant les points problématiques pour l'utilisateur

5.2.2 La manipulation

Dans la représentation de l'utilisateur en environnement virtuel (*cf.* figure 5.8), quatre configurations sont associées à la manipulation : deux concernent la manipulation d'un objet (*cf.* figure 5.8 ; configurations 2 et 5), deux celle de la scène (*cf.* figure 5.8 ; configurations 3 et 6). Une scène pouvant se définir comme un objet particulier, nous traiterons de façon conjointe ces configurations.

Selon les configurations spatiales, le point de vue de l'utilisateur est soit à l'intérieur, soit

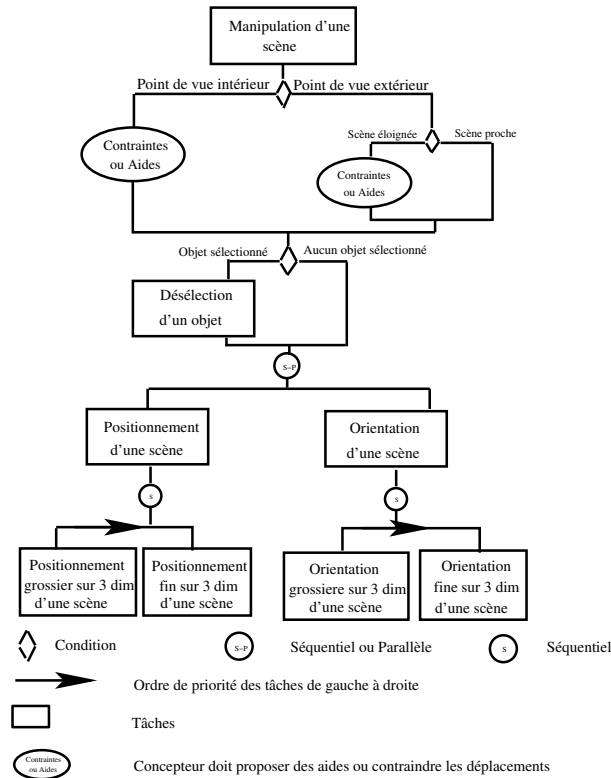


La tâche de positionnement peut être réalisée avant la tâche d'orientation ou inversement. Les sous-tâches de déplacement (positionnement et orientation) sont réalisées de façon séquentielle ou parallèle en fonction du dispositif technique utilisé.

Figure 5.11 – Modélisation de la tâche de manipulation d'un objet virtuel identifiant les points problématiques pour l'utilisateur

à l'extérieur de la scène. Plus précisément, le point à soulever est la distance entre l'objet virtuel et le point de vue de l'utilisateur. Dans les cas où les environnements virtuels doivent être soumis aux contraintes du monde réel (notamment pour les applications de simulation, de formation), l'objet virtuel doit se trouver à moins d'un mètre cinquante du point de vue de l'utilisateur pour pouvoir être manipulé. Par contre, si l'environnement virtuel n'est pas contraint, alors tout objet virtuel visible est manipulable quelle que soit la distance le séparant du point de vue. Dans le premier cas, l'utilisateur peut reproduire les références spatiales de l'environnement réel. Dans le second cas, l'élaboration du modèle mental de cette tâche de manipulation peut engendrer des difficultés. De plus, l'utilisation d'une interaction à distance peut être difficile à gérer du point de vue des référentiels spatiaux mais également techniquement. En effet, dans le cas de la manipulation d'objets virtuels, un utilisateur doit, en

premier lieu, le sélectionner. Plus l'objet sera distant du point de vue de l'utilisateur, plus il risque d'être perçu comme petit¹¹. Or, nous savons que plus la cible à sélectionner est petite et plus la distance à parcourir pour l'atteindre est importante, plus cette sélection est coûteuse en temps et difficile à réaliser (Fitts, 1954). De plus, si l'objet est éloigné du point de vue, l'utilisateur peut avoir des difficultés pour visualiser les transformations effectuées sur celui-ci. L'objet peut, par exemple, être approché du point de vue pour aider la visualisation. Cependant ce type d'interaction à *distance* offre également un certain nombre d'avantages tels qu'une minimisation des déplacements du point de vue.



La tâche de positionnement peut être réalisée avant la tâche d'orientation ou inversement. Les sous-tâches de déplacement (positionnement et orientation) sont réalisées de façon séquentielle ou parallèle en fonction du dispositif technique utilisé.

Figure 5.12 – Modélisation de la tâche de manipulation d'une scène identifiant les points problématiques pour l'utilisateur

Dans le cas de la manipulation de la scène dans sa globalité (*cf.* figure 5.12), un problème particulier se pose. En effet, quand le point de vue de l'utilisateur est à l'intérieur de la scène et que les transformations sont effectuées sur le référentiel de cette scène, celle-ci peut être manipulée sur les six degrés de liberté autour de ce point de vue. Cette configuration

11. L'un des indices principaux de la perception de la profondeur est la taille relative des objets : plus ils sont éloignés du point de vue, plus les objets sont perçus comme petits.

n'est absolument pas naturelle, elle pourrait être assimilée à celle d'un individu placé dans une pièce, celle-ci tournant autour de lui. Une telle situation peut fortement perturber tout individu et surtout rendre son repérage spatial complexe. Une solution pourrait être d'interdire la manipulation de la scène lorsque le point de vue est à l'intérieur. Cela peut se révéler excessif, en effet pour des applications particulières, telles que la visualisation de molécules ou de tout objet sans référence verticale, ce type d'interaction est très performant. Le concepteur devra alors proposer des aides pertinentes comme par exemple un représentation graphique¹² de la position relative de la scène par rapport au point de vue de l'utilisateur (*cf.* figure 5.13).

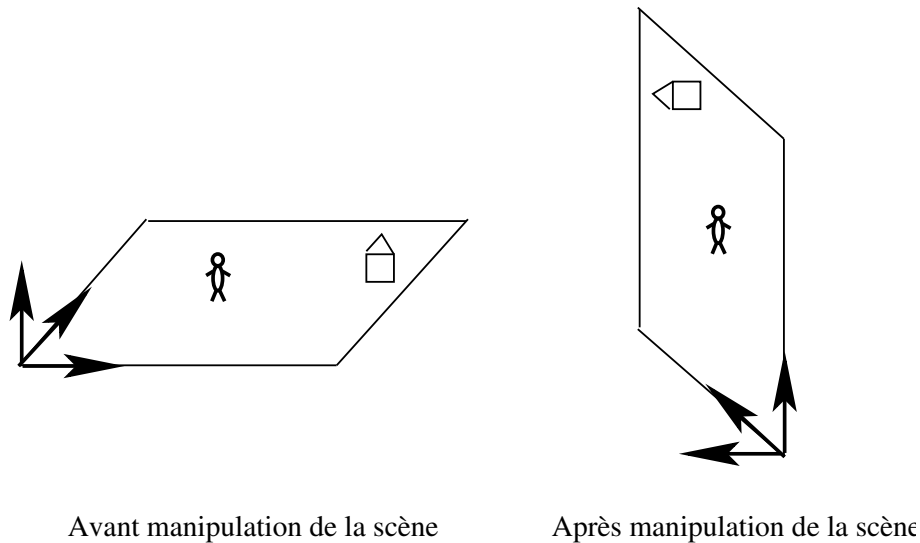


Figure 5.13 – Exemple d'aide graphique pour repérer la position et l'orientation de la scène

Quand le point de vue de l'utilisateur est à l'extérieur, l'utilisateur se trouve dans une configuration qu'il peut assimiler à celle d'un objet qu'il manipule devant lui. Par exemple, si la scène est une ville, l'utilisateur peut assimiler cette configuration à la manipulation d'une maquette de cette ville. Deux points doivent être notés : le premier est que l'étape de sélection (présente dans le modèle de manipulation des objets) n'est plus nécessaire, puisque la scène dans sa totalité est manipulée ; le second point est que, selon le type d'application, il pourra être pertinent de contraindre certaines orientations. La visualisation d'une maquette de ville à l'envers (toit vers le bas) est peu pertinente.

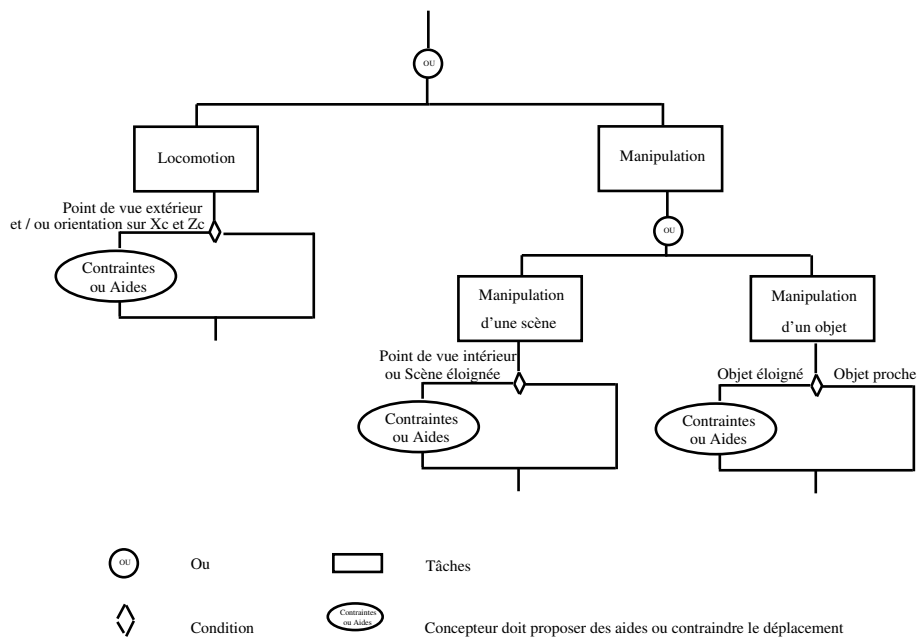
Notons que ce problème ne se pose pas pour la manipulation d'objets virtuels non décomposables puisque le point de vue ne peut pas être dans l'objet. Pour le cas d'objets décomposables, la réflexion revient à celle que nous avons menée sur la scène.

¹². De même que précédemment, cette représentation graphique n'a pas été validée expérimentalement et est proposée à titre d'exemple

Ces différentes remarques, nous permettent de proposer deux modèles hiérarchiques de la tâche de manipulation un premier pour la manipulation d'objet, un second pour la manipulation de la scène. Ils sont présentés sur les figures 5.11 et 5.12. Ces modèles montrent notamment que le passage entre ces deux sous-tâches dépend de la sélection ou non d'un objet virtuel. Ainsi pour manipuler un objet virtuel, l'utilisateur doit, en premier lieu, le sélectionner ; tandis que pour manipuler la scène, aucun objet ne doit être sélectionné.

5.2.3 Synthèse

A partir de notre représentation de l'utilisateur en environnement virtuel, nous venons de compléter les modèles hiérarchiques issus de la littérature proposés dans le chapitre 2. Nous avons ainsi obtenu trois modèles hiérarchiques : un pour la locomotion et deux pour la manipulation. Ces trois modèles des tâches permettent d'illustrer l'ensemble des configurations proposées dans notre représentation de l'utilisateur en environnement virtuel. Il reste ainsi une dernière étape qui consiste en une synthèse de ces modèles afin de montrer les liens existants entre ces tâches. Le modèle de synthèse de la figure 5.14 montre clairement que selon la tâche ou la position du point de vue, de nombreuses difficultés peuvent apparaître pour l'utilisateur lors de l'interaction.



Le modèle hiérarchique de la tâche de locomotion est disponible sur la figure 5.10 ; le modèle hiérarchique de la tâche de manipulation d'un objet est disponible sur la figure 5.11 et celui de la tâche de manipulation d'une scène est présenté sur la figure 5.12.

Figure 5.14 – *Modèle de l'interaction en environnement virtuel*

Cette modélisation hiérarchique construite à partir de l'analyse des référentiels spatiaux des utilisateurs vise à soutenir l'élaboration ou la validation de nouvelles interfaces en permettant de mettre en évidence les difficultés engendrées par les changements de position du point de vue (intérieur, extérieur) ou celles engendrées par les changements de référentiels du mouvement (point de vue, scène, objet).

Dans les sections précédentes, nous avons insisté sur le fait que chaque déplacement ou mouvement peut être interprété par l'utilisateur en fonction de deux systèmes de référence, l'un égocentrique, l'autre exocentrique. Ces modèles des tâches définissent les transformations géométriques nécessaires à la réalisation d'une tâche, mais n'intégrant pas l'interprétation que se fait l'utilisateur de ces transformations. Un utilisateur peut donc interpréter les tâches de manipulation et de locomotion en terme de transformations sur le repère géométrique de la scène ou inversement.

Plusieurs solutions peuvent être proposées à ce problème d'interprétation des transformations. La première consiste à laisser l'utilisateur choisir d'effectuer des transformations sur le point de vue ou sur la scène. Cependant cette solution oblige le concepteur à proposer simultanément les deux modes d'interaction. Se posent alors les problèmes de changement de référentiels du mouvement et ce problème est loin d'être trivial comme le montrera notre étude de *Cosmo Player* dans la sous-section 5.3.1. La seconde solution consiste à soutenir la mise en place par l'utilisateur du référentiel spatial correspondant à la tâche à réaliser. Ainsi, il peut être pertinent de soutenir l'utilisation d'un référentiel égocentrique pour réaliser une tâche de locomotion et celle d'un référentiel exocentrique pour une tâche de manipulation. Dans le chapitre 6, nous explorerons ce point soulevé par les travaux de Tan (Tan *et al.*, 2003 ; 2004 ; Tan, 2004) qui ont notamment montré qu'un grand écran pouvait soutenir la mise en place d'une stratégie égocentrique.

Bien que ce modèle ne prenne pas en compte cette gestion des référentiels spatiaux, il peut nous permettre d'analyser des interfaces existantes ou d'en construire une nouvelle. Nous traitons des exemples concrets d'application de notre modèle dans la section suivante.

5.3 Construction et analyse d'interfaces

Dans cette section, les modèles des tâches d'interaction en réalité virtuelle, définis précédemment, sont utilisés pour analyser des interfaces existantes ou en construire une nouvelle et cela afin de les valider. Dans un premier temps, nous analyserons une interface logicielle dédiée au petit écran de type tableau de bord *Cosmo Player 2.1*. A partir de l'analyse de cette interface et de notre modèle de l'interaction, nous construirons une interface logicielle similaire *IRI (Interface à Représentation Imagée)* (Tyndiuk *et al.*, 2004). Nous concluons en

montrant la pertinence de ce modèle pour évaluer une interface dédiée au mur immersif : le *CAT (Control Action Table)* (Hachet, 2003). *IRI* et le *CAT* seront utilisés dans le chapitre 6 pour étudier les caractéristiques de l'utilisateur influençant sa performance en réalité virtuelle.

5.3.1 *Evaluation d'une interface conçue pour un petit écran : Cosmo Player*

La première interface logicielle que nous évaluons est *Cosmo Player 2.1*. Nous commencerons par la présenter, puis nous l'analyserons en nous basant sur notre modèle de l'interaction. Nous montrerons ainsi les difficultés posées par les changements de référentiel. Afin de compléter notre réflexion, nous présenterons une expérience préliminaire, nous permettant de relever l'importance des différences inter-individuelles dans la gestion des référentiels spatiaux.

Présentation de l'interface

*Cosmo Player*¹³ est un *plug-in* gratuit permettant d'interagir avec des environnements virtuels construits en *VRML*¹⁴ (*Virtual Reality Modelling Language*), il s'utilise conjointement avec un navigateur internet (*Internet Explorer*, *Netscape Navigator*). Nous avons étudié ce *plug-in* en début de notre travail de thèse alors qu'il était le plus courant. Il est actuellement supplanté par des produits tels que *Cortona*¹⁵ ou *Octoga*¹⁶ dont les fonctionnalités sont globalement similaires. Ce type d'interface permet d'utiliser des applications de réalité virtuelle sans matériel coûteux et/ou encombrant. Une souris et un écran sont seulement nécessaires. Ces interfaces peuvent être qualifiées de peu immersives d'un point de vue visuel car elles n'utilisent pas de technologie permettant d'immerger le regard de l'utilisateur dans l'environnement virtuel.

Cosmo Player se présente sous la forme d'un tableau de bord (ensemble de boutons interactifs) permettant d'interagir avec un environnement virtuel visualisé sur un ordinateur classique. Le tableau de bord est positionné en bas de l'écran et l'environnement virtuel est affiché dans une fenêtre au dessus comme l'illustre la figure 5.15. *Cosmo Player* propose deux modes de navigation différents grâce à deux tableaux de bord distincts (*cf.* figure 5.16) : *le mode déplacement* et *le mode examen*. Le passage d'un mode à l'autre se fait par la sélection d'un bouton.

• **Le mode déplacement** permet à l'utilisateur d'effectuer des opérations géométriques sur le repère du point de vue ce qui correspond à la locomotion. Ce mode est illustré par le modèle hiérarchique présenté sur la figure 5.17. Les définitions des opérations géométriques se

13. Accessible en Juillet 2005 : <http://www.karmanaut.com/cosmo/player/>.

14. Accessible en Juillet 2005 : <http://www.w3.org/MarkUp/VRML/>.

15. Accessible en Juillet 2005 : <http://www.parallelgraphics.com/products/cortona/>.

16. Accessible en Juillet 2005 : <http://www.octaga.com/>.



Figure 5.15 – Visualisation d'un environnement virtuel urbain avec Cosmo Player

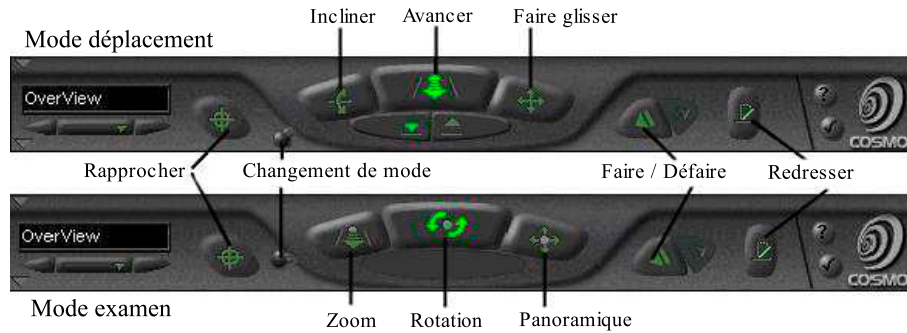
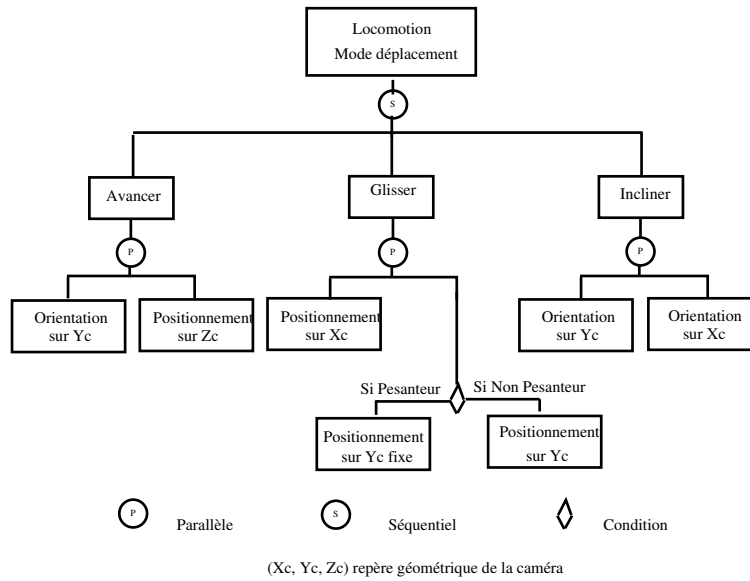


Figure 5.16 – Interface graphique de Cosmo Player

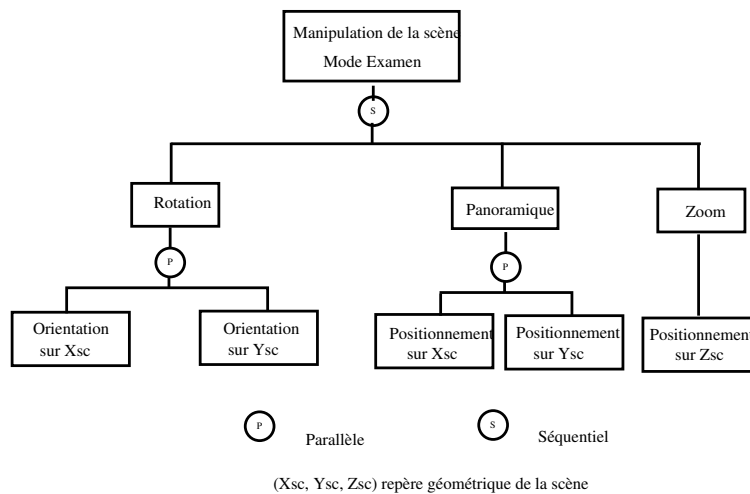
basent sur les repères de figure 5.4 page 98.

- La fonction **Avancer** permet une rotation sur l'axe vertical couplée avec une translation sur l'axe de la profondeur. L'utilisateur perçoit les déplacements dans la scène comme s'il marchait (ou volait, lorsque l'environnement n'a pas de contraintes de gravité).
- La fonction **Glisser** permet une translation sur l'axe horizontal et sur l'axe vertical. Cette fonction correspond pour la translation horizontale à la marche en pas chassé, pour la translation verticale à l'augmentation de l'altitude de l'observateur.
- La fonction **Incliner** permet une rotation par rapport aux axes du plan frontal. Elle correspond à tourner sur soi-même pour la rotation sur l'axe vertical et à se tourner vers le ciel ou le sol pour la rotation sur l'axe horizontal.
- Les fonctions **Pesanteur** et **Non Pesanteur** sont symétriques. La sélection de la fonction *Pesanteur* contraint les translations verticales, les changements d'altitude du

Figure 5.17 – *Modèle hiérarchique du mode déplacement*

point de vue. Ces fonctions permettent de limiter la fonctionnalité *Glisser*.

- **Le mode examen** permet à l'utilisateur d'effectuer des opérations géométriques sur le repère de la scène et correspond donc à la manipulation. Ce mode est illustré par le modèle hiérarchique présenté sur la figure 5.18.

Figure 5.18 – *Modèle hiérarchique du mode examen*

– La fonction *Rotation* permet des rotations couplées sur l'axe horizontal et l'axe vertical de la scène. Cette fonction consiste à faire tourner un objet.

- La fonction *Panoramique* permet des translations sur l'axe vertical et l'axe horizontal. Le point de vue est statique, mais il suit la direction de l'objet. Cette fonction correspond au déplacement d'un objet sur un même plan.
- La fonction *Zoom* permet des translations sur l'axe de la profondeur. Elle correspond au rapprochement ou à l'éloignement d'un objet.

Ces deux modes d'interaction, *déplacement* et *examen*, présentent également des fonctions communes pouvant être considérées comme des raccourcis aux interactions précédentes ou comme des fonctionnalités permettant de récupérer les erreurs de l'utilisateur.

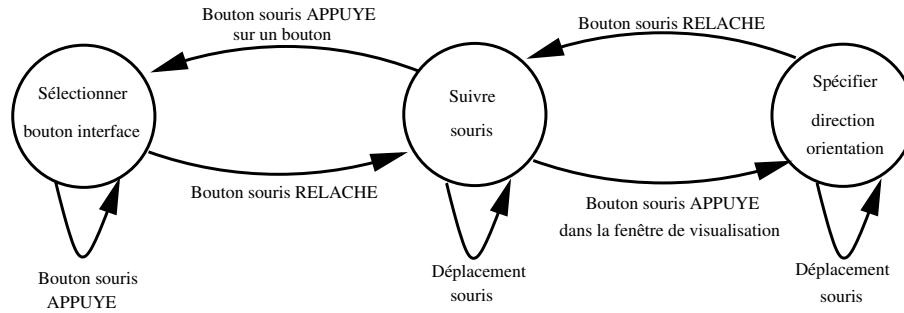
- La fonction *Rapprocher* permet de sélectionner un objet et de rapprocher le point de vue de celui-ci. La trajectoire utilisée est directe à travers la scène.
- La fonction *Changer de point de vue* permet à l'utilisateur de sélectionner des points de vue existant présélectionnés par le constructeur de la scène.
- La fonction *Redresser* permet d'aligner le repère du point de vue et le repère de la scène.
- La fonction *Faire / Défaire* permet d'annuler ou de rétablir la dernière action effectuée.

Pour utiliser ces différentes fonctionnalités, l'utilisateur doit sélectionner le bouton correspondant sur le tableau de bord, puis effectuer les transformations géométriques grâce aux mouvements de la souris. L'utilisateur doit indiquer avec sa souris, la position de départ du déplacement (de la caméra ou de la scène), son amplitude, son orientation et son arrêt. Cette suite d'actions peut se représenter grâce à un diagramme de transitions montrant les différents états nécessaires à la réalisation de l'interaction (*cf.* figure 5.19). Ce diagramme de transitions montre que chaque changement de fonctionnalité est coûteux en terme d'étapes d'interaction (en comparaison de celui de l'utilisation classique d'une souris présentée précédemment sur la figure 2.2, page 27 et de celui présenté ultérieurement pour qualifier le *CAT* illustré sur la figure 5.27, page 125). L'utilisation d'une telle interface est donc relativement coûteuse pour un utilisateur.

Nous venons de décrire succinctement *Cosmo Player*. En nous basant sur notre modèle de l'interaction, nous présentons une analyse de cette interface.

Analyse de Cosmo Player avec notre modèle de l'interaction

Nous cherchons, désormais, à analyser le système d'aides ou de contraintes permettant d'éviter les configurations d'interaction problématiques. *Cosmo Player* ne propose aucune aide pour faciliter l'interaction quel que soit le mode d'interaction étudié. Par contre, certaines interactions ne sont pas autorisées ou sont contraintes.



Chaque cercle représente un état du système. Les flèches représentent les événements permettant les changements d'état ou de rester dans l'état courant.

Figure 5.19 – *Diagramme de transitions pour l'interaction avec Cosmo Player*

Ainsi, dans le *mode déplacement*, l'orientation du point de vue sur l'axe de la profondeur n'est pas autorisée. En effet, aucune fonctionnalité ne permet d'effectuer des rotations sur cet axe. Les rotations sur les autres axes ne sont pas contraintes, or nous avons montré qu'elles devaient l'être pour faciliter l'interaction. Le point de vue peut donc être totalement inversé par rapport à l'axe du sol, ce qui entraîne des difficultés importantes pour interpréter ses déplacements. Une autre contrainte incluse dans l'interface est que les déplacements sur la verticale peuvent être interdits grâce à la fonctionnalité *pesanteur*. Nous avons mentionné qu'autoriser l'utilisateur à *voler* pouvait le perturber. Dans ce cas, il est nécessaire de fournir des aides, ce qui n'est pas le cas dans *Cosmo Player*. Dans notre modèle de l'interaction, nous avons pris le parti de séparer le positionnement du point de vue et son orientation. *Cosmo Player* propose de coupler les rotations sur l'axe vertical et les déplacements sur celui de la profondeur. Ce choix semble judicieux, car il est en accord avec les déplacements en environnement réel. En effet, nous pouvons avancer vers une direction et effectuer des changements de direction de façon simultanée.

Le *mode examen*, quant à lui, doit être comparé au modèle hiérarchique de la manipulation d'une scène. En effet, à notre connaissance *Cosmo Player* ne permet pas de manipuler un objet particulier de cet environnement. Il ne considère pas la position du point de vue de l'utilisateur. Ainsi, il est possible de manipuler la scène alors que le point de vue est à l'intérieur de celle-ci. Il en résulte une désorientation totale de l'utilisateur. Là encore *Cosmo Player* ne propose aucune aide. La figure 5.20 montre ce que peut *voir* un utilisateur dans cette configuration. Nous pouvons également remarquer que l'orientation sur l'axe de la profondeur n'est pas proposée. Aucun paramètre de notre modèle ne permet de justifier ce choix, mis à part la nécessité de réduire le nombre de degrés de liberté pour faciliter l'interaction.

Le dernier point à soulever est le passage du *mode déplacement* au *mode examen*. Cette interface permet de poser clairement le problème du changement de référentiel du mouvement :

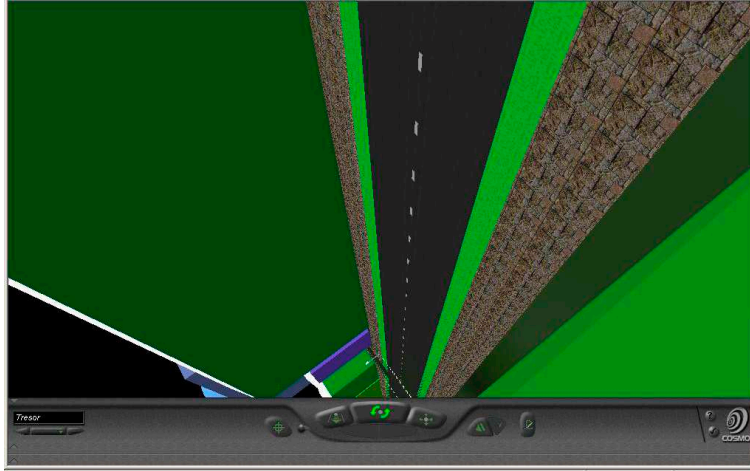


Figure 5.20 – *Vue après rotation sur le monde virtuel*

le passage entre le référentiel de la scène et celui du point de vue. En effet, lorsque des rotations sont effectuées sur le repère de la scène, puis que des transformations sont effectuées sur le repère du point de vue, alors le repère du point de vue et celui de la scène ne sont plus nécessairement alignés (*cf.* figure 5.21). Ainsi par exemple l'axe vertical de la scène peut être aligné avec celui du point de vue (*cf.* figure 5.21, Y_{sc} n'est plus aligné avec Y_c , mais avec X_c). La sémantique des déplacements n'est plus la même. Dans le cadre de *Cosmo Player*, si l'utilisateur passe du *mode examen* au *mode déplacement*, une transformation géométrique, permettant d'orienter le point de vue dans un sens naturel (c'est-à-dire d'éviter que l'utilisateur ait la tête en bas par rapport à l'environnement) est appliquée automatiquement à la scène tridimensionnelle. Cette transformation automatique n'est pas facilement identifiable par un utilisateur et risque de le perturber fortement. Il ne peut plus se construire un modèle mental de la situation d'interaction puisqu'il ne comprend pas nécessairement les transformations effectuées lors de ce changement de mode. De plus, elle lui est imposée ce qui implique la perte de l'orientation initiale choisie par l'utilisateur.

Pour observer les conséquences de ces possibilités de changements de référentiels, les comportements des utilisateurs de *Cosmo Player* ont été étudiés grâce à l'expérimentation présentée dans le paragraphe suivant.

Expérience sur les changements de référentiel

Pour mieux cerner les problèmes posés par ces changements de référentiel, une expérimentation préliminaire a été menée en utilisant *Cosmo Player*. Dans cette expérience, 20 étudiants informaticiens (15 garçons et 5 filles) ayant entre 22 et 28 ans ($m = 22,28$; $\sigma = 1,73$) devaient

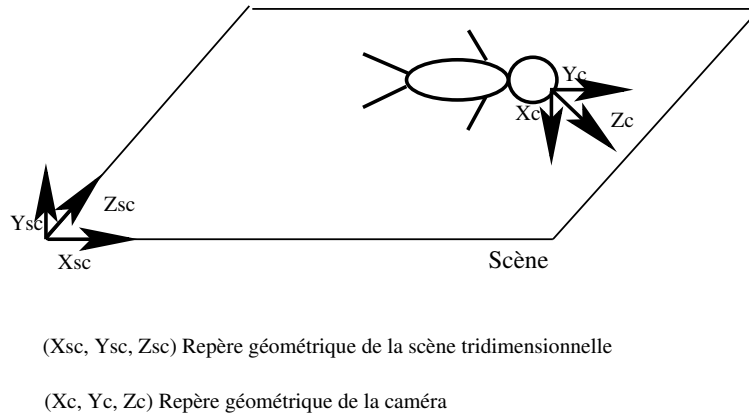


Figure 5.21 – *Non alignement des repères du point de vue et de la scène tridimensionnelle*

trouver 5 trésors cachés dans un environnement virtuel urbain (cf. figure 5.15). La tâche pouvait être réalisée en utilisant le *mode déplacement* et/ou le *mode examen*. Quatre mesures ont été effectuées :

1. le temps nécessaire à la réalisation complète de la tâche noté *Temps* ;
2. le nombre de fonctionnalités utilisées par les sujets au total, noté *Fonction-Totales* ;
3. le nombre de fonctionnalités utilisées en *mode déplacement*, noté *Fonction-Déplacement* ;
4. le nombre de fonctionnalités utilisées en *mode examen*, noté *Fonction-Examen*.

En fonction de ce nombre de fonctionnalités utilisées, deux groupes de sujets ont été construits. Un groupe de 15 sujets utilisant statistiquement plus de fonctionnalités en *mode déplacement* a été constitué [$U = 0,00; p < 0,01$]¹⁷. Les résultats sont significatifs pour $p < 0,05$). De même un second group de 5 sujets utilisant statistiquement plus de fonctionnalités en *mode examen* a été défini [$U = 3,5; p < 0,01$] (cf. tableau 5.2).

Les deux groupes de sujets ont mis autant de temps pour réaliser la tâche [$U = 34,50; p > 0,05$] ($m = 14,95$ pour les sujets utilisant le *mode déplacement* ; $m = 13,60$ pour les sujets utilisant le *mode examen*) et au total ils utilisent autant de fonctionnalités différentes [$U = 32,50; p > 0,05$] ($m = 49,47$ pour les sujets utilisant le *mode déplacement* ; $m = 47,00$ pour les sujets utilisant le *mode examen*) (cf. tableau 5.2).

Les résultats de cette expérience préliminaire montrent que pour réaliser la même tâche certains sujets (la majorité) préfèrent utiliser le *mode déplacement* tandis que d'autres sujets préfèrent utiliser le *mode examen*. Quelle que soit la stratégie choisie, les performances (en

¹⁷. Le test statistique non paramétrique (donc spécifique au petit échantillon de sujets) utilisé est le U de Mann-Withney, il permet de comparer les performances de deux groupes de sujets

	<i>Mode déplacement</i>	<i>Mode examen</i>
Temps	m = 14,95 ; σ = 4,72	m = 13,60 ; σ = 3,23
Fonction-Totale	m = 49,47 ; σ = 13,74	m = 47,00 ; σ = 16,52
Fonction-Déplacement	m = 42,20 ; σ = 13,23	m = 17,80 ; σ = 6,72
Fonction-Examen	m = 7,27 ; σ = 7,48	m = 29,20 ; σ = 11,69

Tableau 5.2 – Performances des sujets en fonction du mode d'interaction utilisé préférentiellement (*m* pour moyenne, σ , pour écart-type

terme de temps et de nombre de fonctionnalités sélectionnées) sont similaires. Ainsi l'utilisation préférentielle du référentiel du point de vue ou de la scène ne semble pas avoir de conséquence directe sur les performances des utilisateurs. Cette expérience préliminaire montre que l'utilisation des différents modes d'interaction (*déplacement vs. examen*) et donc des différents référentiels du mouvement ne sont pas similaires pour tous les sujets. La proposition simultanée des deux modes d'interaction peut donc permettre à tous les sujets d'avoir des performances identiques. Ces premiers résultats semblent montrer que les utilisateurs choisissent leur mode d'interaction en fonction de leur système de référence. Cependant, il existe une forte limitation à nos travaux du fait de la population testée : des étudiants en informatique et essentiellement des hommes, mais également par l'implémentation du changement de référentiel. L'étude de *Cosmo Player* nous a permis de montrer que les solutions informatiques proposées pour ce changement de référentiel pouvaient être perturbatrices pour l'utilisateur.

Dans la suite de ce travail, nous nous intéressons à l'étude des transformations sur le référentiel du point de vue (à la locomotion) et à celle sur le référentiel des objets ou de la scène (à la manipulation). La problématique des passages entre ces deux référentiels n'est pas étudiée. En effet, il nous semble plus pertinent de se focaliser sur les propriétés de chacune de ces tâches (locomotion et manipulation) avant d'étudier le passage de l'une à l'autre. L'étude de ce passage repose sur son implémentation, sur la façon de gérer les problèmes de non alignement des référentiels. L'étude séparée de chaque tâche, peut apporter des éléments de réponse à cette problématique. Une nouvelle interface de type tableau de bord (*IRI*) permettant de séparer ces deux tâches a donc été construite.

5.3.2 Construction d'une interface conçue pour un petit écran : IRI

Une interface de type tableau de bord *IRI* pour *Interface à Représentation Imagée* a été construite (Tyndiuk *et al.*, 2004). Elle fonctionne sur le même principe que *Cosmo Player* (sélection des fonctionnalités grâce à des boutons et spécification de la direction, amplitude dans l'environnement). Le diagramme de transition est le même que celui présenté pour *Cosmo Player* (*cf.* figure 5.19, page 117). Cette interface a été développée en langage C++ avec la

bibliothèque Coin 3D¹⁸.

Deux interfaces indépendantes ont donc été construites : une pour la locomotion et une pour la manipulation d'objets. La même charte graphique a été utilisée pour élaborer ces deux interfaces afin de faciliter la construction éventuelle d'une interface unique.

Concernant l'interface de locomotion, les rotations sur l'axe de la profondeur ont été interdites comme pour *Cosmo Player*. Les rotations sur le plan frontal ont été limitées en fonction des contraintes biomécaniques des muscles du cou, soit à un angle de 45 degrés. Le couplage de la translation sur la profondeur et des rotations sur l'axe vertical a été conservé. Le changement d'altitude a également été autorisé. Le modèle hiérarchique de l'interface de locomotion est présenté sur la figure 5.22. Cette interface, où l'orientation est contrainte est, en partie, en accord avec notre modèle de l'interaction. Par contre, le choix de ne pas contraindre le déplacement sur la verticale peut être critiqué. Cependant, il se justifie par le fait que l'interface n'est pas dédiée à des applications précises, elle peut potentiellement être utilisée dans des environnements sans référence gravitationnelle.

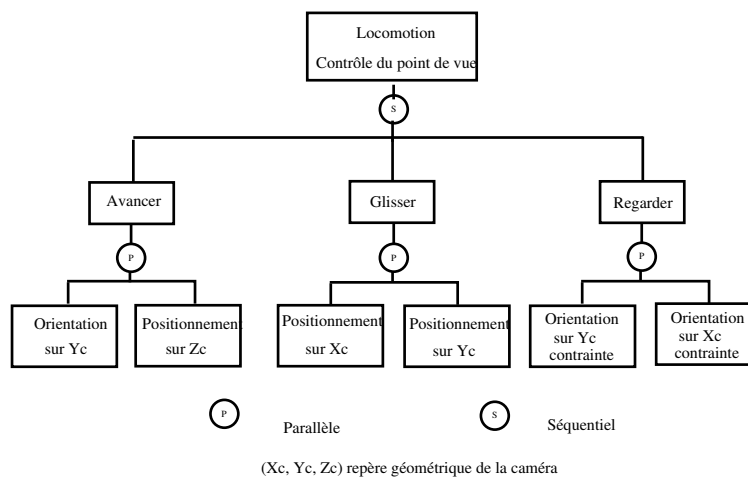


Figure 5.22 – Modèle hiérarchique de l'interface de locomotion d'IRI

Concernant l'interface de manipulation, il est possible de manipuler un objet particulier ou de manipuler la scène dans sa totalité. Le point de vue ne pouvant plus être manipulé, il est nécessairement à l'extérieur de la scène. Nous proposons des translations et des rotations sur les trois dimensions. Par rapport à *Cosmo Player*, une fonctionnalité permettant d'orienter l'objet virtuel sur l'axe de la profondeur a été ajoutée. Le modèle hiérarchique de l'interface de manipulation est présenté sur la figure 5.23. Les rotations sur le plan frontal ont été couplées comme de nombreuses applications le proposent (*Cosmo Player, Cortona*). Ainsi, une fonctionnalité permet des translations sur le plan frontal et une autre des rotations sur ce même

18. Accessible en Juillet 2005 : <http://www.coin3d.org>.

plan. La symétrie de ces deux fonctionnalités peut aider l'utilisateur à appréhender l'interface. L'axe de la profondeur est considéré séparément en translation et en rotation. Nous n'avons pas considéré dans l'implémentation de l'interface le problème de la distance entre l'objet à manipuler et le point de vue, mais ce point a été contrôlé dans l'implémentation des tests de manipulation (*cf.* chapitre 6).

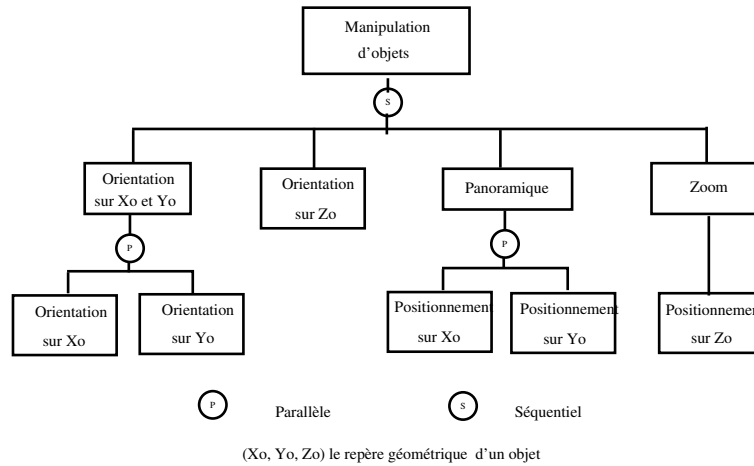


Figure 5.23 – *Modèle hiérarchique de l'interface de manipulation d'IRI*

Pour chacune de ces fonctionnalités, une icône représentant la transformation géométrique que peut effectuer l'utilisateur a été conçue. Le choix de ces représentations est inspiré des autres interfaces existantes telle que *Cortona* et *Cosmo Player*. Notre interface est présentée sur la figure 5.24.

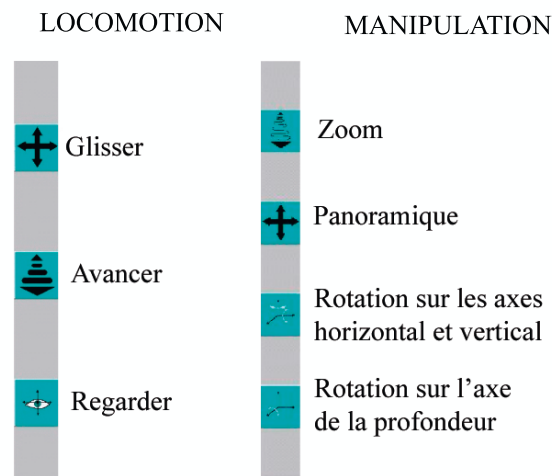


Figure 5.24 – IRI - Interface à Représentation Imagée

Cette interface est un prototype, elle n'a pas pour vocation d'être utilisée en dehors du cadre de ces travaux de recherche sur l'interaction en réalité virtuelle. En effet, l'objectif de cette recherche est double, étudier les caractéristiques des tâches d'interaction, mais également étudier l'impact des caractéristiques de l'utilisateur sur les performances d'interaction. La construction d'une interface permet de contrôler plus précisément son implémentation, d'enregistrer des mesures et donc d'avoir un matériel expérimental rigoureux. Cette interface ne respecte pas strictement notre modèle de l'interaction. Cependant, elle en est plus proche que *Cosmo Player*. *IRI* a été développée en parallèle de nos modèles de la locomotion et de la manipulation. Certaines conclusions résultent notamment de l'observation de l'utilisation d'*IRI*. Elle doit encore être améliorée, notamment à travers la proposition d'aide, afin qu'elle respecte strictement nos modèles.

Afin de contrôler l'utilisabilité de cette interface, à chaque utilisation de celle-ci, nous avons demandé aux sujets de remplir un questionnaire d'ergonomie (*cf.* Annexe A). 92 étudiants l'ont complété. Les résultats montrent que 89 % des sujets considèrent l'interface comme facile à comprendre et 85 % comme facile à apprendre. 61 % trouvent les mouvements facilement identifiables. 65 % sont satisfaits du résultat de leur action. 80 % des sujets n'éprouvent aucune difficulté à réaliser des translations. Par contre 59 % des sujets ont des difficultés avec les rotations. Ces résultats sont relativement en faveur de l'interface. Cependant seulement 27 % des sujets se sentent précis, 19 % rapides et 69 % des sujets trouvent qu'ils font de nombreuses erreurs. Précisons que dans le cadre de nos tests, l'utilisateur ne disposait que de quelques minutes pour se familiariser avec l'interface. Les sujets semblent donc avoir compris le fonctionnement de l'interface, même s'ils ressentent quelques difficultés pour l'utiliser de façon efficace.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à une autre interface totalement différente : le *CAT*. Cette interface est spécifique aux murs immersifs. Elle est décrite et analysée dans la sous-section suivante.

5.3.3 Evaluation d'une interface dédiée au mur immersif : le CAT

Le *CAT* (*Control Action Table*) (*cf.* figure 5.25) est un prototype développé spécifiquement pour être utilisé devant les murs immersifs, permettant une interaction collective, conçu par Martin Hachet (Hachet & Guitton, 2002 ; Hachet *et al.*, 2003 ; Hachet, 2003). Pour une description technique de cette interface, nous renvoyons le lecteur à Hachet (2003). Le *CAT* est un interacteur moteur mesurant environ 1 mètre de haut et permettant des interactions sur six degrés de liberté. Il ressemble à une table circulaire. Le plateau de la table peut être tourné dans l'espace selon les trois dimensions. Il est équipé de capteurs permettant de récupérer les forces appliquées sur la table (*cf.* figure 5.26). De plus, une tablette graphique est fixée sur le

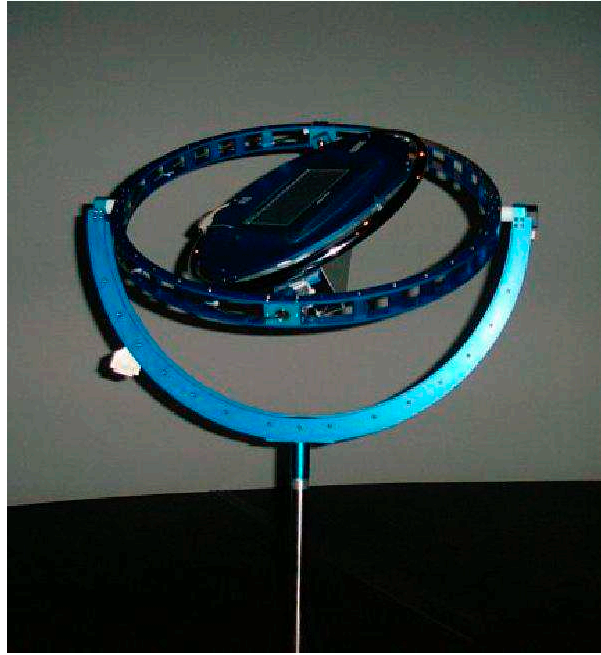


Figure 5.25 – Le CAT - Control Action Table (*Hachet, 2003*)

dessus du plateau pour permettre la sélection d'objets virtuels. Les transformations (rotations ou translations) effectuées par l'utilisateur sur le *CAT* peuvent être appliquées sur le repère de la caméra, sur celui de la scène, ou sur celui des objets. Cependant, il n'est pas possible d'utiliser simultanément la manipulation de la scène, d'un objet et de la caméra.

Dans cette interface, les degrés de liberté ne sont pas séparés comme dans les interfaces précédentes. L'utilisateur peut effectuer simultanément des rotations et des translations selon les trois dimensions. Il en résulte un diagramme de transition très simple pour modéliser l'interaction (*cf.* figure 5.27). Lorsque des manipulations physiques (pressions sur le plateau, orientation du plateau) sont effectuées sur le *CAT*, un mouvement du point de vue ou d'un

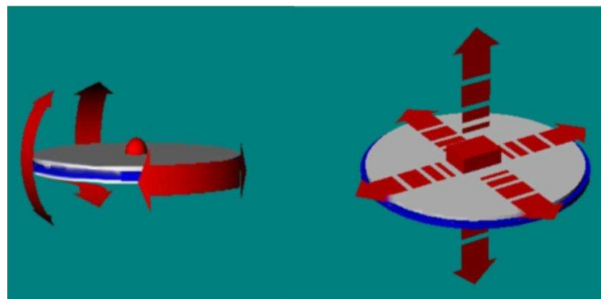
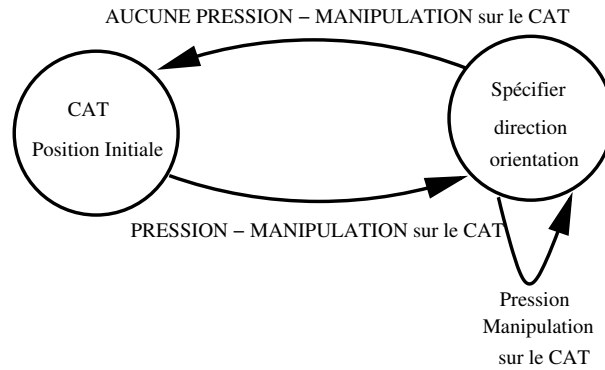


Figure 5.26 – Réalisation des translations et des orientations avec le CAT (*Hachet, 2003*)

objet est effectué.



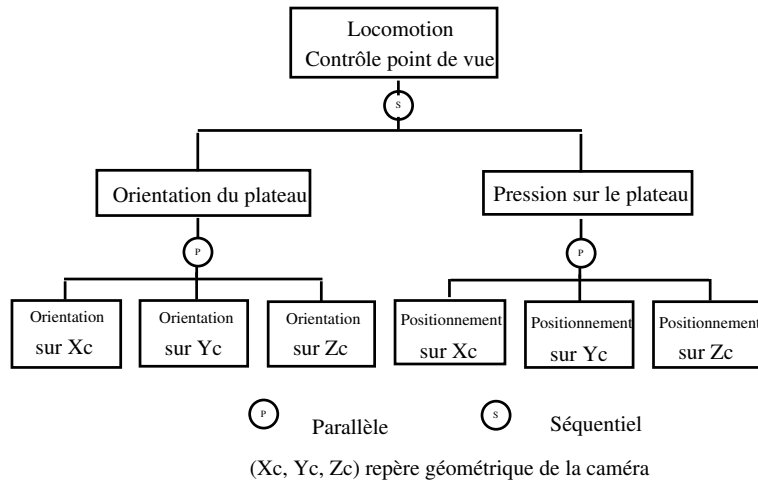
Chaque cercle représente un état du système. Les flèches représentent les événements permettant les changements d'état ou de rester dans l'état courant.

Figure 5.27 – *Diagramme de transitions pour l'interaction avec le CAT*

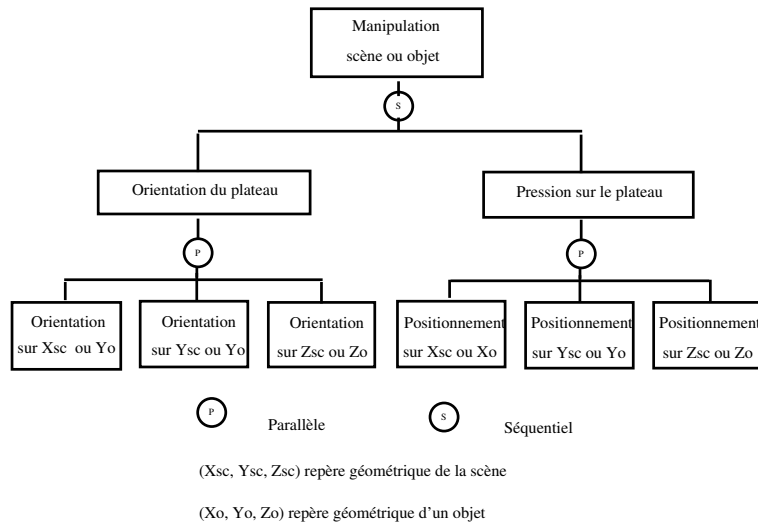
Lorsque le *CAT* est utilisé pour contrôler le point de vue de l'utilisateur, la métaphore d'interaction utilisée est celle du contrôle de véhicule¹⁹. Les mouvements du point de vue sont attachés aux mouvements du *CAT* qui peut être assimilé à un volant de véhicule ou à un guidon (cf. figure 5.28). Ainsi, l'orientation du plateau du *CAT* correspond à l'orientation du point de vue de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Le plateau du *CAT* fournit donc, par sa position, un retour d'informations tactiles à l'utilisateur. Ce retour peut être qualifié de *retour haptique passif* par opposition au retour haptique qualifié d'*actif* où l'utilisateur est informé par un retour d'effort (c'est-à-dire que ses mouvements sont contraints par des forces physiques appliquées sur ses déplacements). Par contre, la position du point de vue par rapport à la scène (intérieur ou extérieur) n'est toujours pas indiquée à l'utilisateur.

Quand le *CAT* est utilisé pour manipuler des objets ou une scène tridimensionnelle, la métaphore d'interaction utilisée se base sur le schème de la manipulation d'un objet réel. Le *CAT* donne aux utilisateurs la possibilité de manipuler des objets virtuels à travers un plateau réel comme s'ils tenaient directement les objets dans leurs mains. Ainsi pour orienter un objet selon une direction, il suffit d'orienter le plateau du *CAT* suivant la même direction et pour déplacer un objet dans une direction donnée, les utilisateurs n'ont qu'à pousser le plateau dans la direction correspondante. Toutes les translations et orientations sont autorisées, il n'y a aucune contrainte (cf. figure 5.29). Comme pour *IRI*, le problème de la position du point de vue ne se pose pas, le point de vue est automatiquement à l'extérieur de l'objet virtuel. L'utilisateur ne peut pas le manipuler. Le problème de la distance entre le point de vue et l'objet n'est pas considéré directement dans l'implémentation de l'interface, mais a été contrôlé

¹⁹. Plusieurs techniques de contrôle de point de vue ont été implémentées, nous détaillons uniquement celle utilisée dans cette thèse.

Figure 5.28 – *Modèle hiérarchique de la locomotion avec le CAT*

dans les tâches de tests (*cf.* chapitre 6).

Figure 5.29 – *Modèle hiérarchique de la manipulation avec le CAT*

Cette interface semble être relativement en accord avec les modèles des tâches de locomotion et de manipulation. En effet, l'orientation similaire de l'objet (ou du point de vue) et du plateau du *CAT* fournit un retour haptique passif pertinent permettant à un utilisateur de se repérer facilement. Ainsi, si son point de vue se trouve orienté dans une configuration non naturelle et perturbatrice, il devra uniquement remettre le plateau dans sa position initiale pour revenir à un point de vue orienté de façon naturelle. L'interaction n'est pas contrainte, mais renseignée : chaque transformation spatiale est retranscrite dans la position du plateau,

l'utilisateur a donc un référent (le plateau) lui permettant de se repérer facilement.

Comme pour *IRI*, une évaluation ergonomique de cette interface a été effectuée lors de chacune de nos expérimentations. Les 92 étudiants ayant évalué *IRI*, ont également évalué le *CAT*, en complétant le questionnaire présenté en Annexe A. Le premier point que nous pouvons souligner est sa robustesse. En effet, peu de prototypes supportent la passation d'une centaine d'utilisateurs inexpérimentés. De plus 97 % des sujets trouvent le fonctionnement du *CAT* facile à comprendre et 97 % facile à apprendre. 92 % des sujets trouvent que les mouvements qu'il est possible d'effectuer sont facilement identifiables. 91 % des sujets n'ont pas eu de difficultés avec les rotations et 84 % avec les translations. 82 % des sujets se sentent précis avec le *CAT*, et 77 % rapides. 92 % des sujets obtiennent le résultat qu'ils souhaitent et seulement 26 % des sujets trouvent qu'ils ont fait beaucoup de manipulations inutiles et d'erreurs. L'ensemble de ces résultats montre clairement que l'utilisabilité du *CAT* est très bonne : les sujets la comprennent et l'utilisent facilement. Cependant le poids et la taille de l'interacteur le rende difficilement transportable et peu pertinent devant un petit écran.

Nous venons de présenter deux interfaces existantes (*Cosmo Player* et le *CAT*) et de proposer l'élaboration d'une troisième (*IRI*). L'analyse de ces interfaces grâce à nos modèles des tâches de locomotion et de manipulation a mis en évidence leur pertinence.

5.4 Synthèse

L'objectif de ce chapitre était d'identifier les points clés de l'interaction sur lesquels les concepteurs d'une application devaient se focaliser. A partir de l'analyse des propriétés des environnements virtuels, une représentation de l'utilisateur en environnement virtuel a été élaborée. Cette représentation a mis en évidence l'existence de trois référentiels du mouvement : celui du point de vue, celui de l'objet et celui de la scène tridimensionnelle. De plus, elle a montré l'importance de la position du point de vue par rapport à la scène (intérieur *vs.* extérieur). Dans le chapitre 2, des modèles hiérarchiques des tâches de locomotion et de manipulation ont été proposés. Ils ont été complétés en fonction de cette représentation de l'utilisateur en environnement virtuel en spécifiant les points clés de l'interaction qu'un concepteur devait considérer. Deux solutions ont été proposées : contraindre le déplacement ou aider l'utilisateur. L'étude de différentes interfaces (*Cosmo Player*, *IRI* ou le *CAT*), nous a permis de conforter ces modèles de l'interaction et de proposer des solutions concrètes en termes de contraintes (dans *IRI*) ou d'aides (dans le *CAT*).

La principale critique qui peut être faite à ces modèles de l'interaction est qu'ils ne considèrent pas les systèmes de référence choisis par l'utilisateur pour interpréter ses déplacements (égocentrique *vs.* exocentrique). Deux pistes de réflexion peuvent être proposées pour explorer

ce point. La première piste consiste à proposer simultanément des interfaces de manipulation et de locomotion. L'étude des interfaces, notamment de *Cosmo Player*, a permis de soulever brièvement la problématique des changements de référentiels. Dans la suite de ce travail, nous ne nous y intéresserons pas explicitement. La seconde piste consiste à soutenir l'utilisation préférentielle d'un système de référence. Par exemple, pour la locomotion, le concepteur doit soutenir l'utilisation d'une stratégie égocentrique par l'utilisateur. Tan (Tan *et al.*, 2003 ; 2004 ; Tan, 2004) a notamment proposé qu'un grand écran pouvait soutenir la mise en place de cette stratégie égocentrique. Nous explorerons ce point dans le chapitre suivant, en étudiant l'impact des caractéristiques de l'utilisateur sur la performance d'interaction.

CHAPITRE 6

Expérimentations

Ce chapitre a pour objectif de déterminer quelles sont les caractéristiques de l'utilisateur influençant sa performance en réalité virtuelle. Dans les chapitres 3 et 4, deux types de caractéristiques ont été identifiées : les caractéristiques cognitives, telles que les capacités spatiales, mnésiques ou motrices et les caractéristiques de stratégie de traitement de l'information, telles que le niveau d'expérience dans la tâche ou la dépendance-indépendance à l'égard du champ. Cette étude cherche à identifier l'impact respectif de ces caractéristiques sur la performance, mais également en fonction de l'interface et de la tâche. Dans cette optique, une expérimentation basée sur deux tâches (la manipulation et la locomotion) et deux interfaces (*IRI* et le *CAT*) a été mise en place.

Plus précisément, la manipulation et deux sous-tâches de locomotion seront étudiées expérimentalement. Dans les chapitres 2 et 5, deux tâches d'interaction ont été identifiées : la manipulation et la locomotion. De même, deux sous-tâches de locomotion requérant la recherche d'une cible ont été définies : la locomotion amorcée où la position de la cible est connue et la locomotion naïve où la position de la cible est inconnue (Darken & Sibert, 1996).

De plus, une des conclusions du chapitre précédent est la nécessité de soutenir la mise en place du référentiel spatial, adapté à la réalisation efficiente de la tâche. Ainsi, les sujets utilisant une stratégie égocentrique pour réaliser la tâche de locomotion devraient être plus performants que les sujets utilisant une stratégie exocentrique. Dans ce cadre, des résultats

expérimentaux (Patrick *et al.*, 2000 ; Tan *et al.*, 2003 ; Tan, 2004) ont montré qu'un grand écran pouvait être une aide pour soutenir la mise en place d'une stratégie égocentrique. C'est pourquoi, l'étude d'*IRI* sera complétée par celle de l'impact de la taille de l'écran sur la performance. Nous étudierons également le *CAT* défini dans le chapitre 5.

L'expérimentation menée dans ce chapitre se focalise donc sur les trois facteurs principaux de l'interaction homme-machine : l'utilisateur, la tâche et l'interface. Dans la première partie de ce chapitre, notre population d'utilisateurs ayant complété cette expérimentation est présentée. Dans la deuxième partie, les performances des utilisateurs en fonction de la tâche et de l'interface seront étudiées. Dans la troisième partie, l'impact des caractéristiques cognitives de l'utilisateur sur sa performance sera analysé. Enfin, dans la quatrième partie, l'impact de la dépendance-indépendance à l'égard du champ et de l'expérience en jeux vidéo sur la performance d'interaction sera étudié. Les deuxième, troisième et quatrième parties seront composées de quatre sous-parties. Dans la première, les principales hypothèses seront présentées, dans la seconde, le protocole expérimental sera détaillé tandis que les troisième et quatrième parties présenteront et discuteront les résultats.

6.1 Participants

98 étudiants volontaires et informés du protocole expérimental ont passé cette expérimentation. Les résultats de 3 sujets gauchers n'ont pas été pris en compte. Grâce à une analyse permettant d'identifier les sujets déviants, les données de 7 autres sujets ont été éliminées de notre étude. La population se compose donc de 88 sujets droitiers, 50 hommes et 38 femmes. La différence d'effectifs entre les hommes et les femmes n'est pas significative [$\chi^2(1) = 1,6 ; p > 0,05$]¹. Tous les sujets ont entre 16 et 37 ans ($m = 24,07 ; \sigma = 3,8$)² et sont en études supérieures. 82 sujets ont un cursus d'études scientifiques comprenant des enseignements d'informatiques, 6 sujets ont un cursus littéraires, mais ils ont une utilisation quotidienne des ordinateurs. Aucun sujet n'a de connaissances en réalité virtuelle. L'ensemble de ces informations a été recueilli grâce à un questionnaire présenté en Annexe B.

Le mal des simulateurs a également été contrôlé grâce à un questionnaire présenté en Annexe B mesurant l'inconfort général, la fatigue, les maux de ventre, de têtes et les gênes visuelles (LaViola, 2000 ; Kolasinski, 1995). Les sujets devaient compléter ce questionnaire à la fin de l'expérimentation. Certains sujets ont ressenti des gênes visuelles et des maux de tête (surtout pendant l'utilisation du *CAT*) mais aucun sujet n'a dû abandonner le test.

1. Le test du χ^2 permet de comparer la distribution théorique des individus en fonction d'une ou plusieurs variables discrètes à la distribution empirique (observée) des individus d'une population.

2. m pour moyenne et σ pour écart-type

6.2 Performances d'interaction

Dans cette première section, les performances d'interaction en réalité virtuelle sont étudiées lors des tâches de manipulation et de locomotion en utilisant soit *IRI* avec un petit ou avec un grand écran, soit le *CAT* avec un très grand écran.

6.2.1 Hypothèses

L'objectif de cette première étude est de déterminer quelles sont les performances des utilisateurs en fonction de l'interface utilisée, de la taille de l'écran et de la tâche à réaliser. Les hypothèses concernant l'interface utilisée et la taille de l'écran sont développées, puis celles concernant la tâche à réaliser.

Interfaces utilisées et taille de l'écran

Dans le chapitre précédent, deux interfaces ont été analysées : *IRI* et le *CAT*. *IRI* s'utilise avec un écran d'ordinateur classique. Le *CAT* a été élaboré pour des applications multi-utilisateurs dans lesquelles les environnements virtuels sont projetés sur des écrans de très grande taille. L'objectif de ce travail n'est pas de comparer les performances des utilisateurs en fonction de ces deux interfaces puisqu'elles ne sont pas utilisées dans le même cadre et ne sont pas interchangeables. En effet, l'utilisation du *CAT* devant un petit écran ou d'*IRI* devant un mur immersif est peu pertinente. C'est pourquoi, dans la suite de ce chapitre, chaque interface sera étudiée de façon indépendante (*cf.* tableau 6.1).

Selon l'interface utilisée *IRI* ou le *CAT*, notre étude ne se focalise pas sur les mêmes points. En effet, concernant le *CAT*, son utilisation semble peu problématique, voire aisée d'après les réponses des utilisateurs au questionnaire d'ergonomie présenté dans le chapitre précédent. En ce qui concerne *IRI*, la problématique est légèrement différente. Son utilisation semble plus difficile comme le confirment les réponses au questionnaire d'ergonomie.

En parallèle de l'étude d'*IRI*, des aides cognitives pertinentes permettant de soutenir l'interaction avec cette interface ont été recherchées. L'une des conclusions principales du chapitre précédent est que les difficultés rencontrées par les utilisateurs pouvaient provenir du système de référence qu'ils utilisent pour interpréter leurs déplacements dans l'environnement. Certains auteurs (Patrick *et al.*, 2000 ; Tan, 2004 ; Tan *et al.*, 2004 ; 2003) ont montré qu'en éloignant l'écran de l'utilisateur et en augmentant la taille de cet écran, les performances des utilisateurs augmentaient uniquement pour des tâches égocentriques. Par exemple, Patrick *et al.* (2000) ont fait une étude comparative entre un petit écran d'une diagonale de 21 pouces et un grand écran mural de 3,35 m de hauteur sur 2,30 m de large en maintenant constant

l'angle de vue horizontal entre les yeux de l'utilisateur et les bords latéraux de l'écran. Ils ont observé que les utilisateurs, après avoir navigué dans l'environnement virtuel, se construisaient une meilleure carte cognitive de cet environnement avec une visualisation sur un grand écran. Tan et ses collaborateurs (Tan, 2004 ; Tan *et al.*, 2004 ; 2003) ont également travaillé sur cette différence de performances. Tan *et al.* (2003) ont montré un gain de performance lors de l'utilisation d'un grand écran pour réaliser une tâche d'orientation spatiale (Guilford & Zimmerman, 1989), alors qu'aucun gain n'a été observé pour une tâche de lecture. Notons que cette tâche d'orientation spatiale consistait en la projection sur un grand écran du test classique papier-crayon d'orientation spatiale de Guilford & Zimmerman (1989). Selon Tan, un grand écran faciliterait l'utilisation par l'individu d'un système de référence égocentrique. Cette hypothèse a été confirmée par des études ultérieures montrant un gain de performances avec un grand écran pour des tâches requérant l'utilisation préférentielle d'un système de référence égocentrique comme la navigation en environnement virtuel (Tan *et al.*, 2004), tandis que d'autres études n'ont montré aucun gain sur un grand écran pour des tâches requérant l'utilisation d'un système de référence exocentrique telles que des tâches de rotation mentale (Tan, 2004).

En conclusion, nous pouvons faire l'hypothèse qu'un grand écran permet un gain de performance pour les tâches de locomotion en soutenant la mise en place d'une stratégie égocentrique. Ce gain ne serait pas nécessairement présent pour des tâches de manipulation (*cf.* tableau 6.2).

Etudes	Facteur <i>Interface</i>	Facteur <i>Tâche</i>
<i>IRI</i> -Locomotion	<i>IRI</i> (Petit Ecran, Grand Ecran)	Locomotion (Amorcée, Naive)
<i>IRI</i> -Manipulation	<i>IRI</i> (Petit Ecran, Grand Ecran)	Manipulation
<i>CAT</i> -Locomotion	<i>CAT</i> Mur Immersif	Locomotion (Amorcée, Naive)
<i>CAT</i> -Manipulation	<i>CAT</i> Mur Immersif	Manipulation

Tableau 6.1 – *Différentes études traitées dans ce chapitre*

Tâches d'interaction

Dans cette expérimentation, les deux tâches principales d'interaction en réalité virtuelle sont étudiées : la manipulation et la navigation. Ces deux tâches ont des finalités différentes, c'est pourquoi, elles sont étudiées séparément (*cf.* tableau 6.1). Concernant la manipulation, une seule tâche sera étudiée : l'orientation et le positionnement d'un objet sur les six degrés de liberté. Concernant la locomotion, la littérature propose différentes tâches variant en fonction de leur complexité. Darken & Sibert (1996) ont notamment défini deux tâches de locomotion ayant comme objectif la recherche d'une cible : la recherche amorcée (l'utilisateur connaît la localisation de la cible) et la recherche naïve (l'utilisateur ne connaît pas la localisation de la

cible). Les hypothèses sont que la tâche de locomotion naïve, qui demande une recherche de cible, nécessite une planification de l'action plus complexe que la tâche de locomotion amorcée. La conséquence directe est que les performances en locomotion naïve devraient être inférieures à celles en locomotion amorcée (*cf.* tableau 6.2).

Etudes	Hypothèses en termes de performances
<i>IRI-Locomotion</i>	Locomotion Naïve < Locomotion Amorcée <i>IRI</i> avec Petit Ecran < <i>IRI</i> avec Grand Ecran
<i>IRI-Manipulation</i>	<i>IRI</i> avec Petit Ecran = <i>IRI</i> avec Grand Ecran
<i>CAT-Locomotion</i>	Locomotion Naïve < Locomotion Amorcée
<i>CAT-Manipulation</i>	Aucune Hypothèse

Tableau 6.2 – *Hypothèses sur les performances des utilisateurs*

Synthèse

Pour résumer, dans cette expérimentation, deux interfaces, *IRI* et le *CAT* sont étudiées. Les effets de deux types d'écran (petit vs. grand) le sont également sur *IRI*. Dans ce cadre, deux tâches sont considérées : la locomotion et la manipulation. Plus précisément, la locomotion est appréhendée à travers deux sous-tâches : la locomotion amorcée et la locomotion naïve.

Quatre études présentées dans le tableau 6.1 ont été identifiées. Chaque étude porte sur une interface et une tâche particulières. Ce découpage sera conservé dans les sections suivantes. La tâche de manipulation réalisée sur le *CAT* ne pouvant être comparée à aucune autre configuration, elle ne sera pas traitée dans cette section, nous y reviendrons dans les suivantes (sections 6.3 et 6.4). Le protocole expérimental permettant de valider ces hypothèses est maintenant présenté.

6.2.2 Protocole expérimental

Dans ce protocole expérimental, les configurations matérielles, les environnements virtuels et les tâches utilisées pour évaluer la performance des utilisateurs sont définis.

Configurations matérielles

Pour étudier les performances des utilisateurs lors de l'utilisation d'*IRI*, un écran d'ordinateur portable d'une diagonale de 15 pouces ($h = 0,23$ m ; $l = 0,30$ m) et un écran de ce même ordinateur projeté sur un tiers d'écran hémicylindrique ($h = 2,80$ m ; $l = 3,30$ m) ont

été utilisés (*cf.* tableau 6.3). Dans une configuration de travail classique, les yeux de l'utilisateur sont à plus de 50 cm de l'écran (Cail & Méreau, 1998). L'angle de vue horizontal³ de l'utilisateur est alors inférieur à 35 degrés et l'angle de vue vertical⁴ est d'environ 28 degrés (*cf.* tableau 6.3). Afin de conserver des angles de vision horizontaux et verticaux équivalents à la configuration utilisant un petit écran, l'utilisateur est positionné à environ 5,50 m de l'écran (*cf.* figure 6.1 et tableau 6.3).

	IRI		le CAT
	Petit Ecran	Grand Ecran	Mur Immersif
Taille de l'écran	h = 0,23 m ; l = 0,30 m	h = 2,80 m ; l = 3,30 m	h = 2,80 m ; l = 9 m
Distance à l'écran	0,50 m	5,50 m	4,50 m
Angle de vision horizontal	≈ 33 degrés	≈ 33 degrés	≈ 100 degrés
Angle de vision vertical	≈ 28 degrés	≈ 28 degrés	≈ 38 degrés

Tableau 6.3 – *Caractéristiques des écrans utilisés (h = hauteur ; l = largeur)*

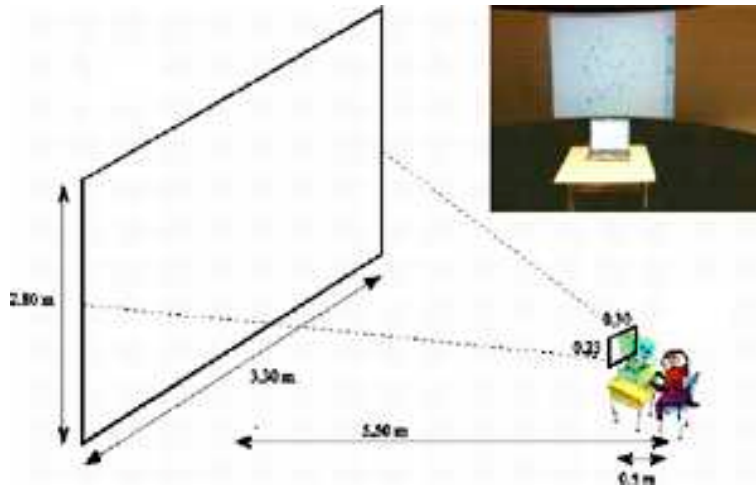


Figure 6.1 – *Configuration d'interaction avec un petit ou un grand écran*

Pour étudier les performances des utilisateurs lors de l'utilisation du *CAT*, la salle de projection *Hémicyclia*⁵ a été utilisée (*cf.* figure 6.2). Dans cette salle, l'environnement virtuel est calculé en temps réel grâce à un équipement de calcul de grande puissance. Il est ensuite projeté sur un écran hémicylindrique⁶ d'environ 2,80 m de hauteur sur 9 m de large

3. L'angle de vue horizontal se définit comme l'angle formé par les yeux de l'utilisateur et les bords latéraux de l'écran.

4. L'angle de vue vertical se définit comme l'angle formé par les yeux de l'utilisateur, le haut et le bas de l'écran. Ces mesures sont à utiliser avec précaution car elles dépendent de la hauteur des yeux de l'utilisateur devant l'écran.

5. Des informations sur *Hémicyclia* sont accessibles sur <https://iparla.labri.fr/hemicyclia/>. (accessible en Septembre 2005)

6. Le rayon du cercle est approximativement égal à 4 mètres.

par 3 vidéo-projecteurs tri-tubes. Si l'utilisateur est placé à moins de 4,50 m de l'écran, son angle de vue horizontal est alors supérieur à 100 degrés. Si le sujet est debout devant l'écran d'*Hémicyclia*, l'angle de vue vertical est d'environ 38 degrés. Cette configuration est définie dans le tableau 6.3.

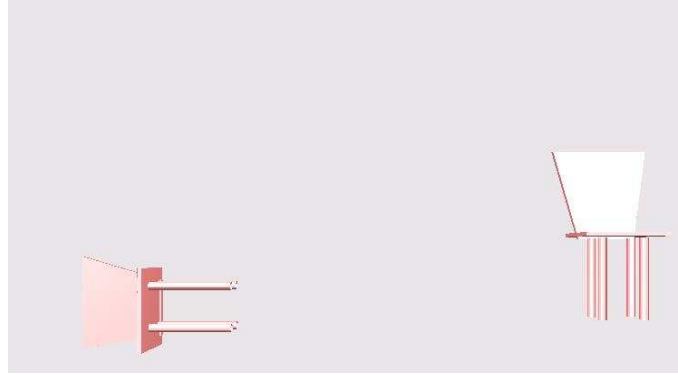


Figure 6.2 – *La salle Hémicyclia*

Les configurations matérielles utilisées pour mesurer les performances des utilisateurs viennent d'être définies, les environnements virtuels et les tâches utilisés sont maintenant présentés.

Environnements virtuels

En s'inspirant des auteurs (Bowman *et al.*, 1998 ; 1999 ; Poupyrev *et al.*, 1997 ; 1998) proposant des environnements très simplifiés, des environnements virtuels ont été construits autour d'un objet unique : une chaise (*cf.* figure 6.3). Cet objet a été choisi car il peut être facilement identifié, quelle que soit son orientation. Un verre, par exemple, n'est pas un objet satisfaisant, car dans certaines orientations, uniquement un cercle peut être visible. De plus, une chaise a une orientation prédominante naturelle (posée sur ses pieds, l'assise vers l'avant) (Snodgrass & Vanderwart, 1980 ; Alario & Ferrand, 1999). La tâche de manipulation peut donc consister à réorienter l'objet dans son orientation préférentielle. Un verre peut subir des rotations sur son axe de la hauteur sans qu'aucune différence ne soit visible.

Figure 6.3 – *Chaises virtuelles*

Tâches d'interaction

Trois tâches d'interaction différentes, de 4 minutes chacune, ont été conçues : une tâche de manipulation et deux tâches de locomotion. Ce temps a été fixé afin de minimiser la durée de l'expérience, la fatigue et la lassitude du sujet. Une tâche d'entraînement, similaire à la tâche de test, est proposée au sujet afin de lui permettre de se familiariser avec la tâche et avec l'interface. L'entraînement n'est pas en temps limité. Chaque sujet décide quand il est prêt à effectuer le test. Pour la tâche de manipulation, l'entraînement se déroule dans un environnement virtuel contenant des objets (des ballons ou des cubes), positionnés et orientés aléatoirement. Le sujet a pour consigne de positionner et d'orienter un des objets sur un des autres objets présents dans l'environnement. Pour la tâche de locomotion, le sujet doit se déplacer dans un labyrinthe virtuel. Les tâches de tests sont maintenant détaillées.

Tâche de manipulation

Une séquence de 30 écrans représentant chacun un environnement virtuel est proposée au sujet. Chaque environnement virtuel est composé d'une chaise orientée aléatoirement et d'une boîte dont la position et l'orientation sont fixes. Le sujet doit déplacer la chaise dans la boîte et l'orienter dans une position précise (les pieds vers le bas de la scène tridimensionnelle et l'assise vers le point de vue de la caméra⁷). Cette tâche est illustrée sur la figure 6.4. Un essai est validé quand la chaise est correctement positionnée. Un nouvel environnement virtuel (contenant une chaise positionnée et orientée différemment) est alors proposé. La chaise change de couleur à chaque essai. Le sujet est ainsi informé de sa réussite dans la tâche. Les positions et orientations des chaises ont été fixées au préalable par l'expérimentateur et sont constantes pour tous les sujets. Elles ont été calculées pour qu'au minimum deux transformations (une

⁷. Cette orientation est représentée sur la figure 6.3, chaise de droite.

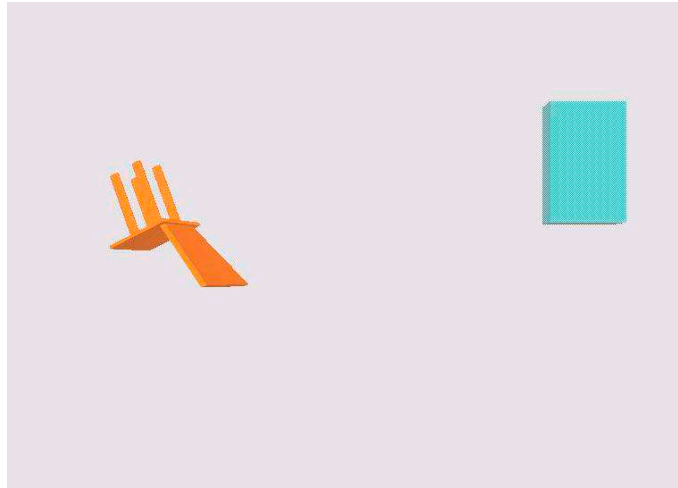


Figure 6.4 – *Illustration de la tâche de manipulation*

en orientation et une en position) soient nécessaires pour réaliser l'essai. La performance du sujet est le nombre de chaises correctement positionnées dans la boîte au cours des 4 minutes du test.

Cette tâche subit quelques modifications lorsqu'elle est complétée avec le *CAT*. En effet, la chaise n'est plus orientée automatiquement, mais manuellement par l'expérimentateur. L'orientation initiale de la chaise doit obligatoirement être spécifiée par l'expérimentateur car elle est dépendante de l'orientation du plateau du *CAT* (l'orientation de l'objet est similaire à celle du *CAT*)⁸. Le temps où l'expérimentateur manipule le *CAT* pour positionner la chaise n'est pas pris en compte dans la durée de la tâche.

Tâches de locomotion

L'environnement virtuel de test contient des chaises disposées semi-aléatoirement. L'une des chaises change périodiquement de couleur. Le sujet doit déplacer son point de vue à proximité de cette chaise, lorsqu'il y parvient, une autre chaise de l'environnement se met alors à changer de couleur. Le sujet doit atteindre cette nouvelle chaise. Cette tâche est déclinée en deux sous-tâches : la locomotion amorcée et la locomotion naïve (Darken & Sibert, 1996).

- Dans la **tâche de locomotion amorcée**, la nouvelle chaise à atteindre est directement visible du point de vue de la dernière chaise atteinte. Les chaises ont été réparties semi-aléatoirement de telle façon que deux chaises devant être atteintes successivement soient séparées d'une distance minimale⁹ et qu'elles restent dans le cône de vision de la caméra

8. Le lecteur trouvera au chapitre 5 la description du fonctionnement du *CAT*.

9. La distance euclidienne moyenne entre deux chaises est l'équivalent de 3,7 fois la hauteur d'une chaise

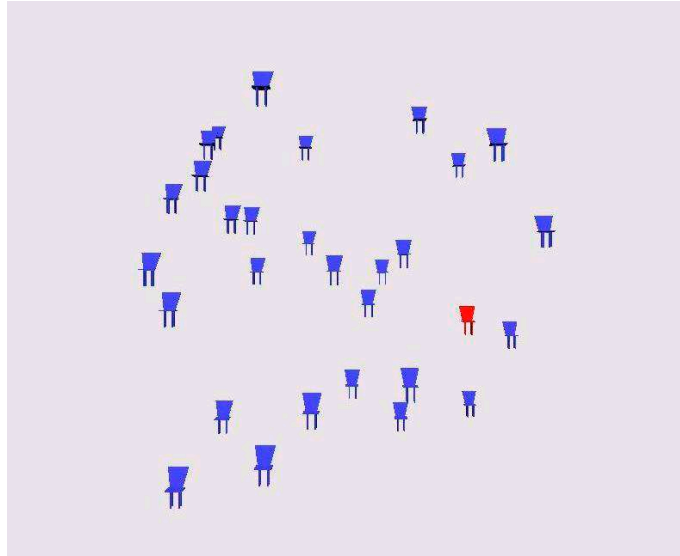


Figure 6.5 – *Illustration de la tâche de locomotion amorcée*

(la caméra étant placée sur la dernière chaise atteinte). Pour la tâche à compléter avec *IRI*, 30 chaises sont disposées dans l'environnement. Pour celle avec le *CAT*, 110 chaises ont été disposées afin de pallier aux résultats de la phase de pré-test montrant que dans cette condition les performances des sujets étant meilleures avec le *CAT*, qu'avec *IRI*.

- Dans la **tâche de locomotion naïve**, la nouvelle chaise à atteindre n'est pas directement visible du point de vue de la dernière chaise atteinte. Le sujet doit chercher la chaise qui change alternativement de couleur dans l'environnement. Les positions des chaises ont été définies de façon à ce que deux chaises ne puissent pas être au même endroit et que les chaises soient éloignées d'une distance minimale¹⁰. L'environnement contient 30 chaises quelle que soit l'interface.

Il faut noter que les distances moyennes entre les chaises sont différentes dans les deux tâches. Cette différence est due aux caractéristiques des tâches. En effet, la tâche de locomotion amorcée nécessite que le sujet puisse toujours voir la prochaine chaise qu'il doit atteindre quelle que soit sa position et son orientation. C'est pourquoi, les distances entre les chaises ont été minimisées afin de limiter l'amplitude des mouvements de l'utilisateur et d'éviter que les chaises sortent du cône de vision de la caméra. Au contraire pour la tâche de locomotion naïve, l'objectif est que la chaise suivante soit recherchée et ne soit pas dans le cône de vision de la caméra, les distances entre les chaises ont donc été augmentées. L'indicateur de performance utilisé est le ratio moyen entre la distance parcourue par l'utilisateur et la distance effective séparant deux chaises dans l'environnement virtuel. Afin de faciliter la lecture de ces

¹⁰. La distance moyenne entre deux chaises est l'équivalent de 14,4 fois la hauteur d'une chaise

indicateurs et de les ramener à une distribution normale, une transformation inverse¹¹ a été effectuée sur cet indicateur. Plus la valeur de l'indicateur est élevée, meilleures sont les performances des sujets.

Chaque sujet a donc complété ces trois tâches (celle de manipulation et les deux de locomotion) sur les deux interfaces (*IRI* et le *CAT*). *IRI* est utilisée avec deux écrans différents : un petit et un grand écran. Chaque sujet a donc réalisé, au total, neuf tâches en réalité virtuelle comme l'indique le tableau 6.4. Pour différencier les différents scores obtenus, l'interface est indiquée en texte normal, la taille de l'écran en indice et la tâche en exposant. Par exemple, la notation $IRI_{PetitEcran}^{Manipulation}$ indique que la tâche de manipulation est réalisée avec *IRI* sur un petit écran.

		<i>IRI</i>		le <i>CAT</i>
		Petit Ecran	Grand Ecran	Mur Immersif
Locomotion	Amorcée	$IRI_{PetitEcran}^{LocoAmorcee}$	$IRI_{GrandEcran}^{LocoAmorcee}$	$CAT_{MurImmersif}^{LocoAmorcee}$
	Naïve	$IRI_{PetitEcran}^{LocoNaive}$	$IRI_{GrandEcran}^{LocoNaive}$	$CAT_{MurImmersif}^{LocoNaive}$
Manipulation		$IRI_{PetitEcran}^{Manipulation}$	$IRI_{GrandEcran}^{Manipulation}$	$CAT_{MurImmersif}^{Manipulation}$

Tableau 6.4 – *Tâches et Interfaces étudiées*

Nous poursuivons notre définition du protocole expérimental en introduisant la procédure de test.

Procédure

L'ensemble de ces tâches a été effectué dans la salle *Hémicylia*. La luminosité de la salle a été conservée constante pour tous les sujets et toutes les tâches. L'expérimentateur faisait visiter la salle et expliquait son fonctionnement avant de débiter le test. Le fonctionnement des interfaces était également expliqué au sujet avant de commencer les tests. L'ordre entre les différentes tâches et les différentes interfaces a été contrebalancé aléatoirement entre chaque sujet. La réalisation de l'ensemble des tâches a demandé, pour chaque sujet, environ 90 minutes.

11. L'indicateur de performance en locomotion est calculé par la formule suivante : $PerfLocomotion = 1 / (distance\ parcourue / distance\ effective) * 100$; la multiplication par 100 permet de simplifier la lecture des résultats

6.2.3 Résultats expérimentaux

Différentes hypothèses sur les performances des sujets ont été introduites en fonction des sous-études identifiées dans le tableau 6.2 (IRI-Locomotion, IRI-Manipulation, CAT-Locomotion, CAT-Manipulation). Pour chaque étude, les résultats sont analysés afin de conforter ou critiquer ces hypothèses. Les statistiques descriptives (moyennes et écarts-types) des performances des sujets en fonction des tâches et des interfaces utilisées sont présentées dans le tableau 6.5.

		IRI		le CAT
		Petit Ecran	Grand Ecran	Mur Immersif
Locomotion	Amorcée	$m = 17,57 ; \sigma = 9,6$	$m = 18,79 ; \sigma = 9,84$	$m = 60,93 ; \sigma = 21,71$
	Naïve	$m = 11,22 ; \sigma = 4,11$	$m = 12,02 ; \sigma = 2,74$	$m = 46,65 ; \sigma = 13,91$
Manipulation		$m = 5,73 ; \sigma = 3,11$	$m = 7,03 ; \sigma = 3,13$	$m = 20,73 ; \sigma = 7,12$

Tableau 6.5 – *Statistiques descriptives des performances en fonction des tâches et des interfaces (m : moyenne ; σ : écart-type)*

IRI - Locomotion

Cette première étude s'intéresse à la réalisation des tâches de locomotion avec *IRI* et avec soit un petit écran soit un grand écran. Selon les hypothèses posées, les performances devraient être meilleures lorsque les tâches sont réalisées avec un grand écran. De plus, les sujets devraient être plus performants dans la tâche de locomotion amorcée que dans celle de locomotion naïve (*cf.* tableau 6.2).

Afin d'étudier les performances des sujets en fonction des tâches de locomotion et de la taille de l'écran, une analyse de variance (*ANOVA*) à deux facteurs *Interface* (*Petit Ecran*, *Grand Ecran*) et *Tâche* (*Locomotion Amorcée*, *Locomotion Naïve*) a été calculée sur les performances obtenues par les sujets. Cette ANOVA permet de comparer les performances obtenues en locomotion amorcée et en locomotion naïve, celles obtenues avec un petit et avec un grand écran, ainsi que les interactions entre ces différentes conditions.

Les résultats indiquent un effet de l'*Interface* [$F(87, 1) = 4,17 ; p < 0,05$] et un effet de la *Tâche* [$F(87, 1) = 62,23 ; p < 0,01$]. L'effet de l'*Interface* montre que les performances obtenues avec un petit écran ($m = 14,4$) sont inférieures à celles obtenues avec un grand écran ($m = 15,4$). Tandis que l'effet de la *Tâche* indique que les performances des sujets en locomotion amorcée ($m = 18,18$) sont meilleures que celles en locomotion naïve ($m = 11,62$). L'interaction entre les facteurs *Interface* et *Tâche* n'est pas significative [$F(87,1) = 0,23 ; p > 0,05$]. Le gain de performances avec un grand écran est donc observé quelle que soit la tâche étudiée.

Cette première analyse montre que les performances en locomotion amorcée sont meilleures que celles en locomotion naïve. Bien que l'angle de vue soit maintenu constant, les performances sont meilleures avec un grand écran qu'avec un petit écran (*cf.* tableau 6.6).

IRI - Manipulation

Concernant la réalisation de la tâche de manipulation avec *IRI* avec un petit ou avec un grand écran, nous avons fait l'hypothèse que les performances sont similaires quelle que soit la taille de l'écran (*cf.* tableau 6.2). Pour comparer ces deux performances, un test de *t de Student* en mesures répétées a été calculé. Cette analyse [$t(87) = -5 ; p < 0,01$] montre que les performances obtenues en utilisant un grand écran ($m = 7,03$) sont supérieures à celles obtenues avec un petit écran ($m = 5,73$) (*cf.* tableau 6.6).

CAT - Locomotion

La dernière étude concerne la réalisation des tâches de locomotion amorcée et naïve avec le *CAT*. L'hypothèse avancée est que lorsque ces tâches sont réalisées sur le *CAT*, les performances en locomotion amorcée sont supérieures à celles en locomotion naïve (*cf.* tableau 6.2). Pour vérifier cette hypothèse, un test de *t de Student* en mesures répétées a été calculé. Le résultat de l'analyse [$t(87) = 7,82 ; p < 0,01$] indique que les performances en locomotion amorcée ($m = 60,93$) sont significativement meilleures que celles en locomotion naïve ($m = 46,65$) (*cf.* tableau 6.6). Ce résultat est donc cohérent avec les hypothèses.

Une synthèse de l'ensemble de ces résultats est présentée dans le tableau 6.6.

Etudes	Résultats en termes de performances
<i>IRI</i> -Locomotion	Locomotion Naïve < Locomotion Amorcée IRI avec Petit Ecran < IRI avec Grand Ecran
<i>IRI</i> -Manipulation	IRI avec Petit Ecran < IRI avec Grand Ecran
<i>CAT</i> -Locomotion	Locomotion Naïve < Locomotion Amorcée

Tableau 6.6 – *Synthèse des résultats sur les performances des utilisateurs*

6.2.4 Discussion

Les analyses statistiques des performances des sujets face à une application de réalité virtuelle confirment la majorité de nos hypothèses. Ces analyses montrent que les performances en locomotion amorcée sont supérieures aux performances en locomotion naïve, quelle que soit l'interface utilisée (*IRI* ou le *CAT*). Dans ces tâches, la performance est évaluée en fonction de

la distance parcourue par l'utilisateur par rapport à la distance optimale. Nous pouvons donc supposer que les performances sont meilleures en locomotion amorcée grâce à une minimisation des erreurs de trajectoire lors des déplacements. En effet, les tâches de locomotion amorcée et naïve, par définition, demandent le déplacement et l'orientation du point de vue de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Cependant, la tâche de locomotion naïve nécessite également que l'utilisateur recherche la cible qu'il doit atteindre. Cette étape de recherche de cible peut demander de parcourir des distances supplémentaires. La tâche de locomotion naïve risque donc d'être plus coûteuse en terme de déplacement, et plus difficile à réaliser.

Concernant l'impact de la taille de l'écran sur la performance, les résultats ont montré que les performances sont meilleures avec un grand écran qu'avec un petit écran, quelle que soit la tâche. Un grand écran apporte donc une aide cognitive, permettant de soutenir un haut niveau de performance. Ce résultat est, en partie, en accord avec les études de la littérature (Tan *et al.*, 2004 ; Patrick *et al.*, 2000). En effet, Patrick *et al.* ont comparé les performances obtenues sur un écran plat (21 pouces), un écran géant ($h = 2,30$ m ; $l = 3,35$ m) et un visiocasque. L'angle de vue est constant dans ces trois configurations et est estimé à environ 50 degrés. Les sujets avaient pour consigne de se souvenir de la localisation de différents points de repères contenus dans un parc d'attraction virtuel. Les performances observées étaient équivalentes sur le visiocasque et l'écran plat, par contre, elles étaient supérieures sur un grand écran. Tan *et al.*, quant à eux, ont demandé à des sujets de se déplacer dans un environnement virtuel, puis de revenir à leur point de départ. La performance était mesurée en termes de distance parcourue par les sujets pour revenir à leur point de départ. Les performances observées étaient meilleures lorsque la tâche était réalisée avec un grand écran. Les résultats obtenus dans notre expérimentation confirment donc ces deux études.

Néanmoins, en nous basant sur les travaux de Tan, nous avons également avancé l'hypothèse que ce gain de performance en locomotion résultait de l'utilisation préférentielle d'un référentiel égocentrique. Dans leur étude, Tan *et al.* (2003) ont demandé à des sujets de compléter un test de compréhension de texte et un test psychométrique d'orientation spatiale (Guilford & Zimmerman, 1989). Ces tests ont été réalisés sur un petit écran ($h = 0,27$ cm ; $l = 0,36$ cm) et sur un grand écran ($h = 1,45$; $l = 1,95$ m). Le test d'orientation spatiale utilisé consistait en deux images représentant des vues subjectives d'un bateau en mouvement sur la mer. Le sujet devait indiquer comment le bateau s'était déplacé entre les deux images. Selon Tan *et al.* (2003), pour être complétée efficacement, cette tâche demande au sujet d'adopter un système de référence égocentrique. Il doit imaginer son changement de point de vue comme s'il était physiquement présent sur le bateau. Les résultats ont montré que les performances au test d'orientation spatiale étaient meilleures avec un grand écran. Par contre pour la tâche de lecture, les performances étaient similaires, quelle que soit la taille de l'écran. Tan a émis l'hypothèse que c'est l'utilisation d'un système de référence égocentrique qui permet un gain

de performance avec un grand écran. Pour vérifier cette hypothèse, Tan a alors proposé une nouvelle expérimentation. Il a forcé les sujets à utiliser une stratégie exocentrique en dégradant la signification des items du test d'orientation spatiale. Pour cela, il a transformé les bateaux en de simples formes géométriques. Les sujets ne pouvaient donc plus donner un sens à leur déplacement. Ils devaient alors adapter leurs stratégies en une stratégie exocentrique. Les résultats de cette expérimentation ne montre aucun gain de performance avec un grand écran. Dans la même optique, l'auteur a proposé à des sujets de compléter un test de rotation mentale projeté sur un petit et sur un grand écran. Selon Tan, ce test de rotation mentale requiert l'utilisation d'un système de référence exocentrique. Là encore, les résultats n'ont indiqué aucun gain de performance avec un grand écran.

Les travaux de Patrick *et al.* (2000) et de Tan (Tan *et al.*, 2003 ; 2004 ; Tan, 2004) montrent donc un gain de performances avec un grand écran uniquement pour des tâches requérant des stratégies égocentriques. Par définition, la tâche de locomotion demande le déplacement et l'orientation du point de vue de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. La tâche de manipulation demande, quant à elle, le déplacement et l'orientation d'un objet dans cet environnement. La tâche de locomotion en environnement virtuel pourrait donc être considérée comme requérant une stratégie égocentrique, tandis que celle de manipulation requerrait une stratégie exocentrique. Dans ce cas, nos résultats expérimentaux devraient indiquer un gain de performances uniquement pour la tâche de locomotion. Or, ils indiquent également un gain de performances pour la tâche de manipulation. Plusieurs hypothèses peuvent être proposées pour expliquer ce phénomène.

Les tâches utilisées dans notre expérimentation sont interactives. Tan et ses collaborateurs (Tan *et al.*, 2003 ; Tan, 2004) ont essentiellement étudié des tâches non interactives : tâche d'orientation spatiale, de lecture (Tan *et al.*, 2003), ou de rotation mentale (Tan, 2004). Dans ces tâches, le sujet doit se représenter ses déplacements ou ceux des objets. Dans nos tâches, le sujet doit réaliser concrètement ses déplacements. Les expériences de Tan font appel à de l'imagerie mentale, ce qui n'est pas le cas de nos expérimentations. Pour réaliser des tâches de rotation mentale en imagerie mentale, le sujet effectue des transformations uniquement sur l'objet et non pas sur son point de vue sur cet objet. Une tâche de manipulation, au contraire, demande au sujet de déplacer et d'orienter un objet physiquement. L'interactivité permettrait donc de soutenir un gain de performance important avec un grand écran quelle que soit la stratégie nécessaire.

Un autre point à souligner concerne la taille de l'écran. Dans notre expérimentation, un écran de plus de 3 m de large sur 2,80 m de haut est utilisé tandis que Tan utilise un écran de 1,95 m de large sur 1,45 m de haut. Les différences entre nos résultats et ceux de Tan peuvent aussi être dues à la taille, bien supérieure, de notre écran (la surface de notre écran est de $8,40 m^2$, celle de celui de Tan est de $2,8 m^2$). Ainsi un très grand écran pourrait

permettre un gain de performance quelle que soit le type de tâche, tandis qu'un écran de taille moyenne permettrait un gain de performance pour certaines tâches seulement. Cette hypothèse demande de nouvelles investigations. Il pourrait, par exemple, être pertinent de renouveler notre expérimentation avec différentes tailles d'écrans intermédiaires afin d'identifier à partir de quelle taille d'écran, un gain de performance peut être observé.

Enfin, une dernière hypothèse peut être faite. Elle concerne l'impact des caractéristiques de l'utilisateur sur la performance en réalité virtuelle. En effet, si un grand écran fournit une aide cognitive, nous pouvons faire l'hypothèse que les facteurs cognitifs influençant ou prédisant la performance avec un petit écran ne sont pas les mêmes que ceux mis en jeu dans l'utilisation d'un grand écran. Un grand écran pourrait faciliter le traitement de l'information spatiale. En effet, la tâche verbale de lecture ne bénéficie pas d'un grand écran (Tan *et al.*, 2003). De même, si le gain de performance avec grand écran est lié à l'utilisation préférentielle d'un système de référence alors la dépendance-indépendance à l'égard du champ pourrait expliquer les différences de performances observées entre un petit et un grand écran. Ces hypothèses sont développées dans les sections suivantes.

Pour résumer, ces différents résultats mettent en relief qu'un grand écran peut soutenir un haut niveau de performance quelle que soit la tâche. Ils montrent également que les performances en locomotion amorcée sont meilleures que celles en locomotion naïve quelle que soit l'interface utilisée. Nous poursuivons cette réflexion et tentons de compléter ces hypothèses en étudiant l'impact des caractéristiques de l'utilisateur sur la performance en réalité virtuelle. L'étude de ces caractéristiques vise notamment à expliquer les différences de performances en fonction de l'interface, de la taille de l'écran et de la tâche.

6.3 Facteurs cognitifs et performances

Cette deuxième section est consacrée à l'étude des caractéristiques cognitives de l'utilisateur. Le premier objectif est d'identifier quels facteurs cognitifs influencent (et donc peuvent éventuellement prédire) la performance en réalité virtuelle en fonction de la tâche étudiée et de l'interface utilisée. Le second objectif est de poursuivre notre étude de l'impact de la taille de l'écran sur la performance lors de l'utilisation d'*IRI*, en identifiant quels facteurs cognitifs sont impliqués lors de l'utilisation d'un petit écran et ne le sont pas dans celle d'un grand écran. Nous débuterons en précisant nos hypothèses, puis en introduisant le protocole utilisé pour évaluer les caractéristiques cognitives de l'utilisateur avant de conclure en présentant et discutant nos résultats.

6.3.1 Hypothèses

Dans le chapitre 4, différentes hypothèses concernant l'impact des caractéristiques cognitives de l'utilisateur sur sa performance en manipulation et en locomotion ont été proposées. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'impact des caractéristiques cognitives des utilisateurs sur la performance en manipulation. Par contre, concernant les tâches de locomotion, les travaux de Waller (2000), ont montré que les utilisateurs ayant de bonnes capacités spatiales, sont plus performants que les utilisateurs ayant de faibles capacités spatiales. Les capacités spatiales devraient donc avoir un impact positif sur la performance en locomotion. La tâche de manipulation, comme celles de locomotion, impliquent la gestion des référentiels spatiaux et un traitement de l'information visuo-spatiale. L'existence de corrélations entre les capacités spatiales et les performances en manipulation peut donc être supposée. Pour étendre cette hypothèse, nous pouvons remarquer que ces capacités spatiales sont sous la dépendance de la mémoire de travail (Baddeley, 1986), plus précisément du calepin visuo-spatial et de l'administrateur central (Hegarty *et al.*, 2000 ; Shah & Miyake, 1996 ; Miyake *et al.*, 2001). Il en résulte que les capacités spatiales, les fonctions sous la dépendance du calepin visuo-spatial (la mémoire visuo-spatiale) et de l'administrateur central (les fonctions de contrôle) devraient influencer les performances de locomotion et de manipulation.

Lors de la revue de la littérature présentée dans le chapitre 4, nous avons constaté que la majorité des études se focalisait sur l'étude des capacités spatiales. Pourtant, les tâches de locomotion et de manipulation demandent à l'utilisateur de percevoir de l'information, de la traiter et de produire une réponse motrice adaptée. En se basant sur le modèle du traitement de l'information défini dans le chapitre 3, l'hypothèse peut également être faite que les capacités sensorielles (première étape du traitement de l'information) et les capacités motrices (dernière étape du traitement de l'information) influencent les performances.

Cependant, ces hypothèses doivent être affinées pour les tâches de locomotion. En effet, la tâche de locomotion naïve étant plus difficile à réaliser que celle de locomotion amorcée, les fonctions cognitives de contrôle et de planification de l'activité (sous la responsabilité de l'administrateur central) devraient être plus fortement corrélées aux performances de locomotion naïve qu'à celles de locomotion amorcée.

Dans ce travail de recherche, deux interfaces différentes sont étudiées : *IRI* et le *CAT*. Le fonctionnement d'*IRI* est basé sur des métaphores magiques. L'utilisateur doit comprendre et apprendre le lien sémantique entre ses actions sur l'interface et le résultats de celle-ci dans l'environnement virtuel. Les utilisateurs ont trouvé cette interface difficile à utiliser et à manipuler. Les performances devraient donc être fortement corrélées aux fonctions de contrôle de l'activité. De plus, un grand écran a été défini comme étant une aide cognitive pour les sujets présentant des difficultés avec un petit écran. Les facteurs cognitifs impliqués dans la

réalisation d'une tâche avec un petit écran ne le seraient donc pas les mêmes que ceux impliqués dans cette tâche avec un grand écran.

Le fonctionnement du *CAT*, quant à lui, est basé sur des schèmes sensori-moteurs. Les utilisateurs ont trouvé cette interface facile à utiliser quelle que soit la tâche. Les performances sur le *CAT* devraient donc être essentiellement corrélées aux capacités sensorielles et motrices des utilisateurs.

Le tableau 6.7 regroupe ces différentes hypothèses en fonction des quatre études identifiées dans la section 6.2. Le protocole expérimental permettant de valider ces hypothèses est maintenant présenté.

Etudes	Hypothèses en termes de performances
<i>IRI</i> -Locomotion	MdT visuo-spatiale, fonctions de contrôle, capacités spatiales, sensorielles et motrices \Rightarrow Locomotion Capacités spatiales, fonctions de contrôle \Rightarrow fortement locomotion naïve Capacités spatiales, fonctions de contrôle \Rightarrow fortement sur petit écran
<i>IRI</i> -Manipulation	MdT visuo-spatiale, fonction de contrôle, capacités spatiales, sensorielles et motrices \Rightarrow Manipulation Capacités spatiales, fonctions de contrôle \Rightarrow fortement sur petit écran
<i>CAT</i> -Locomotion	Capacités sensorielles et motrices \Rightarrow Locomotion
<i>CAT</i> -Manipulation	Capacités sensorielles et motrices \Rightarrow Manipulation

Tableau 6.7 – *Hypothèses concernant l'impact des caractéristiques cognitives de l'utilisateur sur la performance* (\Rightarrow : impliquée dans; *MdT* : *Mémoire de Travail*)

6.3.2 Protocole expérimental

Pour valider ces hypothèses, les différentes étapes du traitement de l'information (mémoire sensorielle, mémoire de travail, réponse motrice) doivent être évaluées. Les techniques d'évaluation utilisées pour chacune de ces étapes sont maintenant présentées. Ces évaluations ont été complétées par les sujets soit dans la salle *Hémicylia*, soit dans un box expérimental. L'ordre entre les différentes évaluations a été contrebalancé aléatoirement entre chaque sujet. La réalisation de l'ensemble des ces tests demande environ 90 minutes à chaque sujet. Une synthèse des tests utilisés est présentée dans le tableau 6.8.

Capacités sensorielles

N'ayant pas identifié de tests standardisés pour évaluer les capacités sensorielles, nous nous sommes basés sur l'expérience originale de Sperling (1960) pour proposer un indicateur (noté *Mé-Sens*) de la capacité de stockage du registre sensoriel visuel. Dans ce test¹², une

12. Ce test a été programmé en langage C++ et avec la bibliothèque Qt.

Fonctions Cognitives		Tests	Scores obtenus
Capacités sensorielles	Registre sensoriel	Test de Sperling	<i>Mé-Sens</i>
Mémoire de Travail - Boucle phonologique	Capacité	Updating (séries de 6)	<i>Stock Verbal</i>
	Traitement	Updating (séries de 8 et 10)	<i>Traitement Verbal</i>
Mémoire de Travail - Calepin visuo-spatial	Capacité	Empan visuel <i>WMS-R</i>	<i>Stock VS</i>
	Traitement	Empan visuel inverse <i>WMS-R</i>	<i>Traitement VS</i>
Mémoire de travail - Administrateur central	Flexibilité	Test Flexibilité <i>TEA</i>	<i>Flexibilité</i>
	Inhibition	Test Inhibition <i>TEA</i>	<i>Inhibition</i>
	Attention Visuelle	Test Balayage visuel <i>TEA</i>	<i>Attention Vis</i>
Capacités Spatiales	Orientation Spatiale	GZ	<i>Orientation</i>
	Visualisation Spatiale	MPFB	<i>VisuMPFB</i>
	Rotation Mentale	MRT	<i>Rotation</i>
Capacités motrices	Temps de réaction	Test alerte phasique <i>TEA</i>	<i>TR</i>
	Temps de mouvement	Tâche de Fitts	<i>TM</i>

Tableau 6.8 – Outils d'évaluation des fonctions cognitives et notations utilisées

série de 25 matrices (4 * 3) de consonnes (dont 5 d'entraînement)¹³ est projetée pendant 250 millisecondes¹⁴. Immédiatement après la projection de la matrice, le sujet doit rappeler par écrit un maximum de consonnes en les positionnant correctement dans une grille. Pour chaque sujet, le nombre moyen de bonnes réponses (lettres et positions correctes) par écran est relevé. Ce test a été passé sur un ordinateur portable ayant un écran de 15 pouces.

Mémoire de travail

Les trois composantes du modèle de Baddeley (1986) de la mémoire de travail ont été évalués : la boucle phonologique, le calepin visuo-spatial et l'administrateur central. Ces tests ont été complétés par une série de tests mesurant les capacités spatiales.

Boucle phonologique Pour évaluer la capacité de stockage et de traitement de la boucle phonologique, l'épreuve dite de *UpDating* (ou mise à jour) (Morris & Jones, 1990 ; Van Der Linden *et al.*, 1999) a été utilisée. Dans ce test¹⁵, le sujet voit défiler 38 séries de consonnes (dont 8 d'entraînement) sur un écran d'ordinateur portable (15 pouces) à la vitesse d'une par seconde¹⁶. Le sujet ne sait pas à l'avance combien de lettres lui seront présentées. Sa tâche consiste à retenir uniquement les 6 dernières lettres qui sont apparues à l'écran. Il doit ensuite

13. Les matrices de consonnes ont été construites en éliminant les séries de lettres sémantiquement significatives (par exemple, TGV). La taille des lettres ($\simeq 1,15$ cm) et la zone de projection ($\simeq h = 13$ cm * $l = 20,5$ cm) sont équivalentes à celle de l'expérience originale (Sperling, 1960).

14. Dans l'expérience originale, le temps de présentation était de 50 millisecondes mais Sperling (1960) a montré que les résultats étaient similaires pour un temps de projection variant entre 15 et 500 millisecondes.

15. Ce test a été programmé en langage C++ et avec la bibliothèque Qt.

16. La taille des consonnes est $\simeq 1,15$ cm, les consonnes sont positionnées au centre de l'écran.

les rappeler par écrit dans leur ordre d'apparition. Les deux scores obtenus sont le nombre des réponses correctes pour les séries de 6 lettres et le nombre des réponses correctes pour les séries de 8 et de 10 lettres. Le premier score (noté *StockVerbal*) évalue la capacité de la boucle phonologique, le second score (noté *TraitementVerbal*) mesure l'aptitude du sujet à traiter de l'information verbale.

Calepin visuo-spatial Les capacités de stockage et de traitement du calepin visuo-spatial ont été évaluées grâce au test d'empan visuel direct et indirect de la *WMS-R* (Wechsler, 1991). Un test similaire d'empan spatial issu de la *WAIS* (Wechsler, 1981) a été utilisé pour étudier la navigation en environnement virtuel (Cutmore *et al.*, 2000 ; Moffat *et al.*, 2001). Le sujet doit regarder l'examineur pointer successivement une série de cibles, puis il doit pointer cette même série dans le même ordre que l'expérimentateur (pour l'empan direct) ou dans l'ordre inverse (pour l'empan indirect). L'expérimentateur augmente le nombre de cibles à pointer jusqu'à que le sujet échoue. Le score obtenu à l'empan direct est noté *StockVS*, celui obtenu à l'empan indirect est noté *TraitementVS*.

Administrateur central Selon Baddeley (1986), trois propriétés essentielles définissent l'administrateur central : la flexibilité, l'inhibition et l'attention sélective. Les tests sélectionnés pour évaluer chacune de ces propriétés sont issus de la batterie informatisée d'évaluation de l'attention : le *TEA* conçu par Zimmermann & Fimm (1994). Le *TEA* est basé sur des tâches de réactions motrices à des stimuli non verbaux facilement identifiables. Les scores obtenus sont des temps de réaction¹⁷. Les sujets ont passé ces tests sur un ordinateur ayant un écran de 15 pouces. Deux boutons externes (fournis avec le logiciel du *TEA*) ont été connectés à cet ordinateur. Les sujets devaient répondre en appuyant sur ces boutons.

- **La flexibilité** a été évaluée grâce au sous-test *flexibilité* du *TEA*. Une forme anguleuse et une forme arrondie sont présentées simultanément et dans un ordre aléatoire à droite et à gauche d'un point de fixation. La forme anguleuse puis la forme arrondie constitue alternativement le stimulus cible. 100 essais sont proposés au sujet. A chaque fois, il doit appuyer sur la touche située du côté où apparaît le stimulus cible. Le score, noté *Flexibilité*, est le temps moyen de réponse.

- **L'inhibition** a été évaluée grâce au sous-test *inhibition* (Go No-Go) du *TEA*. 50 stimuli défilent devant le sujet. Celui-ci ne doit réagir que pour certaines formes particulières. Plus précisément, le sujet doit identifier 2 stimuli cibles parmi les 5 stimuli différents présentés. Le score, noté *Inhibition*, est le temps moyen de réponse au stimulus cible.

- **L'attention sélective visuelle** a été évaluée grâce au sous-test *balayage visuel* du *TEA*.

17. Le nombre d'erreurs n'est pas discriminant chez des sujets sains.

Cette tâche consiste à repérer un stimulus critique dans un ensemble de signes disposés en 5 lignes et 5 colonnes. Le stimulus cible est un carré ouvert en haut, présent ou non au sein de la matrice. Le sujet doit se prononcer sur l'absence ou la présence de la cible au sein de la matrice. Le score, noté *AttentionVis* est le temps moyen de détection de la cible lorsque celle-ci est présente.

Capacités spatiales

Deux dimensions principales des capacités spatiales ont été définies par Lohman (1979) : l'orientation et la visualisation spatiale. Pour évaluer ces capacités spatiales, un test d'orientation et deux de visualisation (le premier utilisant du matériel bidimensionnel, le second du matériel tridimensionnel) ont été proposés.

- **L'orientation spatiale** a été mesurée grâce au test du même nom de Guilford & Zimmerman (1989). Des couples d'images représentant un bateau sont présentés au sujet. Le sujet doit indiquer (en sélectionnant 1 réponse parmi les 5 proposées) de quelle façon la position du bateau s'est modifiée dans la seconde image, par rapport à sa position de départ. Le score total obtenu au test est noté *Orientation*. Le sujet dispose de 15 minutes pour compléter le maximum d'items du test qui en compte 60. Ce test a été utilisé en réalité virtuelle par Moffat *et al.* (1998).

- **La visualisation spatiale** a été évaluée avec deux tests : la forme révisée du *Paper form Board de l'université du Minnesota MPFB* (Likert & Quasha, 1954) et le test de rotation mentale de Vandenberg & Kuse (1978). Le premier utilise du matériel bidimensionnel, le second du matériel tridimensionnel.

Dans le *Paper form Board de l'université du Minnesota MPFB*, une figure plane morcelée est proposée au sujet, il doit choisir parmi 5 autres figures laquelle correspond à la figure recomposée. Le score total est noté *VisuMPFB*. Le sujet dispose de 14 minutes pour compléter un maximum d'items du test qui en comporte 64.

Dans le test de rotation mentale, chaque item comporte 5 figures, un modèle¹⁸ et 4 structures parmi lesquelles le sujet doit indiquer celles qui sont semblables au modèle. Pour les lycéens et les étudiants, certains auteurs (Albaret & Aubert, 1996) conseillent de limiter le temps à 6 minutes, c'est pourquoi ce temps de 6 minutes a été retenu. Le score est noté *Rotation*. En réalité virtuelle, ce test a été utilisé par Moffat *et al.* (1998) et Parsons *et al.* (2004).

18. Le modèle est une des structures utilisées par Shepard & Metzler (1971).

Capacités motrices

Deux aspects des capacités motrices ont été évaluées : le temps de réaction simple et le temps d'un mouvement ciblé (Fitts, 1954 ; MacKenzie, 1991).

Temps de réaction : Le sous-test *alerte phasique* de la batterie TEA de Zimmermann & Fimm (1994) a permis d'évaluer le temps de réaction à un stimulus visuel (une croix). Le sujet doit appuyer sur un bouton dès qu'il voit une croix apparaître au centre de l'écran. Le temps de réaction moyen sur vingt essais est calculé et noté *TR*.

Le temps du mouvement : En nous basant sur le paradigme de la tâche de Fitts (1954), le temps du mouvement entre deux cibles a été évalué. Le sujet doit effectuer 20 allers-retours entre 2 cibles présentées sur un écran. Ces cibles sont alignées horizontalement. Elles font 1 cm^2 et sont éloignées de 14 cm. Ce test a été complété sur un ordinateur portable ayant un écran de 15 pouces avec le logiciel libre *GFLMB*[©] (*Generalized Fitt's Law Model Builder*) *Version 1.1*¹⁹. Le score obtenu, noté *TM*, est le temps de mouvement moyen sur l'ensemble des allers-retours. Cette mesure permet d'obtenir un indicateur de la performance motrice d'un sujet lors de l'utilisation d'une souris.

Construction de scores composites

Certaines fonctions cognitives ont été évaluées grâce à plusieurs indicateurs comme par exemple les capacités motrices qui l'ont été grâce au temps de réaction et au temps du mouvement. Afin de réduire le nombre d'indicateurs pour chaque fonction cognitive, des scores composites ont été construits. Dans un premier temps, chaque variable a été normalisée par une transformation selon la *loi de Gauss*, également appelée méthode de standardisation par z-scores²⁰. Un score composite a été calculé en moyennant les indicateurs mesurés pour chaque fonction cognitive. Une transformation (multiplication par -1) a été effectuée sur les variables *Contrôle* et *Moteur* afin que les scores les plus hauts signifient que les sujets sont performants comme pour les autres variables étudiées. Ces scores composites sont présentés dans le tableau 6.9.

19. Le logiciel libre *GFLMB* est accessible sur <ftp://snowwhite.cis.uoguelph.ca/pub/fitts-law/gflmb> (accessible en juillet 2005).

20. La méthode de standardisation par z-score transforme une variable en une nouvelle variable dont la moyenne est nulle et l'écart-type vaut 1. Cette transformation permet d'exprimer des variables dans une unité standard afin de pouvoir les comparer ou les regrouper. Soit X , une donnée de la variable V , m_V la moyenne de cette distribution et σ_V son écart-type, alors $z\text{-score} = \frac{(X - m_V)}{\sigma_V}$.

Fonctions cognitives		Scores obtenus	Scores composites
Perception	Mémoire sensorielle	<i>Mé-Sens</i>	
Mémoire de Travail - Boucle phonologique	Capacité	<i>StockVerbal</i>	<i>MdT-Verbal</i>
	Traitement	<i>TraitementVerbal</i>	
Mémoire de Travail - Calepin Visuo-Spatial	Capacité	<i>Stock-VS</i>	<i>MdT-VS</i>
	Traitement	<i>Traitement-VS</i>	
Mémoire de travail - Administrateur central	Flexibilité	<i>Flexibilité</i>	<i>Contrôle</i>
	Inhibition	<i>Inhibition</i>	
	Attention Visuelle	<i>Attention-Vis</i>	
Capacités Spatiales	Orientation Spatiale	<i>Orientation</i>	<i>CapSpatiales</i>
	Visualisation Spatiale	<i>VisuMPFB</i>	
	Rotation Mentale	<i>Rotation</i>	
Réponse motrice	Temps de réaction	<i>TR</i>	<i>Moteur</i>
	Temps de mouvement	<i>TM</i>	

Tableau 6.9 – *Scores composites pour évaluer les fonctions cognitives*

Nous présentons maintenant les résultats constitués sur des scores obtenus aux tests cognitifs ainsi que sur les performances d'interaction en réalité virtuelle.

6.3.3 Résultats expérimentaux

Les résultats sont présentés successivement pour chacune des sous-études identifiées précédemment (*IRI-Locomotion* ; *IRI-Manipulation* ; *CAT-Locomotion* ; *CAT-Manipulation*). La démarche d'analyse statistique est la même pour chaque étude. La première étape consiste à analyser les corrélations partielles²¹ entre les facteurs cognitifs et les performances des sujets. Ces corrélations partielles correspondent au calcul des corrélations existantes entre les performances en réalité virtuelle et chaque facteur cognitif lorsque les autres facteurs cognitifs sont contrôlés, c'est-à-dire lorsque l'influence des autres facteurs cognitifs sur le facteur cognitif étudié est neutralisée. Cette analyse se base sur les corrélations partielles car la matrice des corrélations simples (*cf.* tableau 6.10) montre que les facteurs cognitifs sont très fortement corrélés entre eux. L'étude des corrélations partielles permet donc d'étudier l'impact de chaque facteur cognitif indépendamment de l'impact des autres facteurs. La deuxième étape de notre démarche consiste à construire deux groupes de sujets : un groupe de sujets "*bons*" et un groupe de sujets "*faibles*" pour chaque facteur cognitif sélectionné. Cette nouvelle variable permet de calculer des ANOVA en fonction de la tâche et de l'interface étudiée. Nous débutons l'analyse des résultats en nous focalisant sur l'étude *IRI-Locomotion*.

21. Les corrélations partielles sont utilisées pour estimer la relation qui existe entre deux variables indépendamment de l'influence d'autres variables explicatives (supposées interférer dans la corrélation). Si les variables contrôlées n'interfèrent pas dans la relation, le coefficient de corrélation partielle a la même valeur que le coefficient de corrélation simple.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1- <i>Mé-Sens</i>	1	0,34**	0,20	0,26*	0,40**	-0,03	0,29**	0,09	0,07	0,24*	0,21*	0,14	0,19	0,12	0,22*
2- <i>MdT-Verbal</i>		1	0,25*	0,05	0,43**	0,04	0,16	0,16	0,08	0,22*	0,02	0,01	0,20	0,22*	0,15
3- <i>MdT-VS</i>			1	0,27*	0,36**	0,20	0,36**	0,32**	0,12	0,26*	0,22*	0,12	0,22*	0,19*	0,29**
4- <i>Contrôle</i>				1	0,38**	0,39**	0,35**	0,25*	0,35**	0,24*	0,20	0,25*	0,29*	0,22*	0,31**
5- <i>CapSpatiales</i>					1	0,29**	0,58**	0,43**	0,41**	0,46**	0,28**	0,36**	0,42**	0,26*	0,36**
6- <i>Moteur</i>						1	0,18	0,22*	0,36**	0,12	0,11	0,19	0,15	0,12	0,15
7- <i>IRI^{Manipulation}_{PetitEcran}</i>							1	0,69**	0,39**	0,61**	0,44**	0,34**	0,43**	0,27*	0,49**
8- <i>IRI^{Manipulation}_{GrandEcran}</i>								1	0,48**	0,55**	0,47**	0,36**	0,33**	0,25*	0,36**
9- <i>CAT^{Manipulation}_{MurImmersif}</i>									1	0,37**	0,41**	0,42**	0,23*	0,25*	0,35*
10- <i>IRI^{LocoAmorcee}_{PetitEcran}</i>										1	0,69**	0,37**	0,43**	0,41**	0,44**
11- <i>IRI^{LocoAmorcee}_{GrandEcran}</i>											1	0,40**	0,34**	0,45**	0,32**
12- <i>CAT^{LocoAmorcee}_{MurImmersif}</i>												1	0,45**	0,31**	0,62**
13- <i>IRI^{LocoNaive}_{PetitEcran}</i>													1	0,34**	0,44**
14- <i>IRI^{LocoNaive}_{GrandEcran}</i>														1	0,30**
15- <i>CAT^{LocoNaive}_{MurImmersif}</i>															1

Tableau 6.10 – Matrice des corrélations simples entre les facteurs cognitifs et les performances d'interaction (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$)

	$IRI_{PetitEcran}^{Manipulation}$	$IRI_{GrandEcran}^{Manipulation}$	$CAT_{MurImmersif}^{Manipulation}$	$IRI_{PetitEcran}^{LocoAmorcee}$	$IRI_{GrandEcran}^{LocoAmorcee}$	$CAT_{MurImmersif}^{LocoAmorcee}$	$IRI_{PetitEcran}^{LocoNaive}$	$IRI_{GrandEcran}^{LocoNaive}$	$CAT_{MurImmersif}^{LocoNaive}$
<i>Mé-Sens</i>	0,07	-0,11	-0,09	0,05	0,13	0,03	-0,01	-0,04	0,05
<i>MdT-Verbal</i>	-0,13	-0,02	-0,05	0,01	-0,15	-0,15	0,04	0,14	-0,01
<i>MdT-VS</i>	0,19	0,18	-0,08	0,1	0,13	-0,02	0,05	0,06	0,15
<i>Contrôle</i>	0,12	0,07	0,17	0,07	0,04	0,09	0,15	0,13	0,16
<i>CapSpatiales</i>	0,46**	0,32**	0,31**	0,33**	0,18	0,31**	0,28**	0,11	0,19
<i>Moteur</i>	-0,04	0,05	0,21	-0,04	0,01	0,05	-0,02	0,01	-0,01

Tableau 6.11 – *Corrélations partielles entre les facteurs cognitifs et les performances en réalité virtuelle (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$)*

IRI-*Locomotion*

Cette première étude s'intéresse à l'impact des facteurs cognitifs sur les performances dans les tâches de locomotion réalisées avec *IRI* avec un petit ou un grand écran. Selon les hypothèses, les performances devraient être corrélées aux indicateurs de capacités sensorielles, motrices, spatiales, à celui des fonctions de contrôle et à celui de la mémoire visuo-spatiale. De plus, l'implication des fonctions de contrôle et des capacités spatiales devrait être plus importante dans les tâches de locomotion naïve réalisées avec un petit écran.

Pour vérifier ces hypothèses, les corrélations partielles entre les différentes performances d'interaction en réalité virtuelle et les facteurs cognitifs sont calculées (*cf.* tableau 6.11). Cette analyse montre que l'indicateur des capacités spatiales est corrélé aux performances obtenues sur un petit écran lors de la réalisation des tâches de locomotion amorcée et naïve. Plus les sujets ont de bonnes capacités spatiales, meilleures sont leurs performances, quelle que soit la tâche de locomotion. Les autres coefficients de corrélation ne sont pas significatifs de ce fait les autres facteurs cognitifs ne semblent pas avoir de liaison significative avec la performance dans des tâches de locomotion réalisées avec *IRI*. Ce premier résultat met en relief le lien entre les capacités spatiales et la performance en locomotion uniquement avec un petit écran.

Pour préciser ce premier résultat, les sujets ont été divisés en deux groupes en fonction de la médiane de leur performance en capacités spatiales. Les sujets ayant des scores en dessous de la médiane constituent le groupe des sujets dits *faibles*, les autres sujets, ayant des scores au dessus de la médiane constituent le groupe des sujets dits *bons*. Une ANOVA à trois facteurs *Interface* (*Petit Ecran, Grand Ecran*), *Tâche* (*Locomotion Amorcée, Locomotion Naïve*) et *Capacités Spatiales* (*bons, faibles*) a été calculée sur les performances d'interaction en réalité virtuelle. Les statistiques descriptives, relatives à cette ANOVA, sont présentées dans le tableau 6.12. Les résultats de cette analyse montrent deux effets principaux. Le premier effet est celui de l'*Interface* [$F(87, 1) = 4,36 ; p < 0,05$]. Les performances obtenues sur un grand écran ($m = 15,4$) sont supérieures à celles obtenues sur un petit écran ($m = 14,4$). Le second effet est celui de la *Tâche* [$F(87, 1) = 67,12 ; p < 0,01$]. Cet effet indique que les performances en locomotion naïve ($m = 11,62$) sont inférieures à celles en locomotion amorcée ($m = 18,18$). L'interaction entre les variables *Interface* et *Tâche* n'est pas significative [$F(87, 1) = 0,23 ; p > 0,05$]. Ces résultats sont cohérents avec ceux observés lors de l'étude des performances brutes dans la section 6.2. Cette analyse montre, de plus, trois autres résultats sur lesquels nous nous focalisons.

Cette analyse indique un effet des *Capacités Spatiales* [$F(87, 1) = 12,93 ; p < 0,01$] selon lequel les performances en réalité virtuelle des sujets *bons* ($m = 16,82$) sont supérieures à celles des sujets *faibles* en capacités spatiales ($m = 12,98$). Deux effets d'interaction sont également observés : une interaction entre les facteurs *Tâche* et *Capacités Spatiales*

$[F(87, 1) = 7,84 ; p < 0,05]$ (cf. figure 6.6) et une interaction entre les facteurs *Interface* et *Capacités Spatiales* $[F(87, 1) = 4,82 ; p < 0,05]$ (cf. figure 6.7). La triple interaction n'est pas significative $[F(87, 1) = 0,58 ; p > 0,05]$.

		$IRI_{PetitEcran}^{LocomotionAmorcee}$	$IRI_{PetitEcran}^{LocomotionNaive}$	$IRI_{GrandEcran}^{LocomotionAmorcee}$	$IRI_{GrandEcran}^{LocomotionNaive}$
Capacités Spatiales	Faibles	$m = 13,83$ $\sigma = 7,70$	$m = 10,06$ $\sigma = 4,50$	$m = 16,44$ $\sigma = 8,21$	$m = 11,58$ $\sigma = 3,22$
	Bons	$m = 21,31$ $\sigma = 9,93$	$m = 12,39$ $\sigma = 3,33$	$m = 21,13$ $\sigma = 10,82$	$m = 12,46$ $\sigma = 2,11$

Tableau 6.12 – *Statistiques descriptives pour l'étude IRI-Locomotion en fonction des groupes de capacités spatiales (m : moyenne ; σ : écart-type)*

L'interaction entre les facteurs *Tâche* et *Capacités Spatiales* (cf. figure 6.6) montre que pour la tâche de locomotion amorcée les performances des sujets ayant de faibles capacités spatiales ($m = 15,13$) sont inférieures à celles des sujets ayant de fortes capacités ($m = 21,22$). Cette différence persiste sur la tâche de locomotion naïve, mais elle apparaît comme beaucoup moins importante ($m = 10,82$ pour les sujets *faibles* ; $m = 12,42$ pour les sujets *bons*). Le calcul d'une ANOVA à deux facteur *Interface* * *Tâche* effectuée uniquement pour le groupe des sujets *faibles* en capacités spatiales montre un effet de la *Tâche* $[F(43, 1) = 24,29 ; p < 0,01]$. Le calcul de cette même ANOVA effectuée sur le groupe des sujets *bons* montre également cet effet de la *Tâche* $[F(43, 1) = 43,12 ; p < 0,01]$. Les performances en locomotion amorcée sont donc meilleures que celles en locomotion naïve quelles que soient les compétences spatiales des sujets.

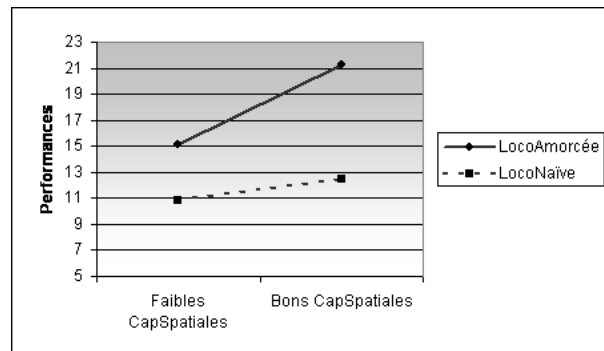


Figure 6.6 – *Interaction entre les facteurs Tâche et Capacités Spatiales*

La seconde interaction observée entre les facteurs *Interface* et *Capacités Spatiales* (cf. figure 6.7) met en avant un gain de performances avec un grand écran pour les sujets ayant de faibles capacités spatiales ($m = 11,94$ avec un petit écran ; $m = 14,01$ avec un grand écran), tandis que les sujets ayant de bonnes capacités ont des performances similaires avec les deux écrans ($m = 16,85$ avec un petit écran ; $m = 16,80$ avec un grand écran). Le calcul

d'une ANOVA sur les facteurs *Interface* et *Tâche* pour chaque groupe de sujets permet de confirmer ces résultats. Cette ANOVA effectuée pour le groupe des sujets *faibles* en capacités spatiales montre un effet de l'*Interface* [$F(43, 1) = 12,95 ; p < 0,05$], tandis que cette même ANOVA effectuée sur le groupe des sujets *bons* ne montre aucun effet de l'*Interface* [$F(43, 1) = 0,004 ; p > 0,05$]. Il n'y a donc aucune différence significative entre les performances obtenues avec un petit écran et celles obtenues avec un grand écran pour les sujets ayant de bonnes capacités spatiales, tandis que cette différence est significative pour les sujets ayant de faibles capacités spatiales.

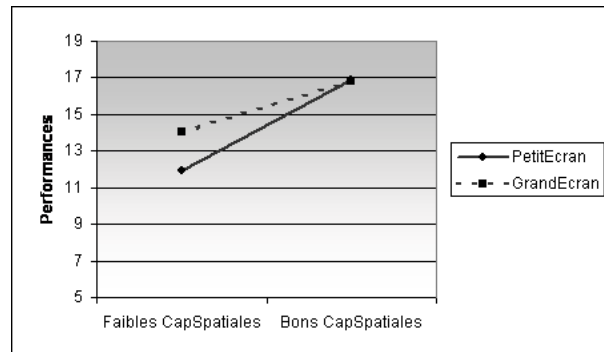


Figure 6.7 – Interaction entre les facteurs Interface et Capacités Spatiales

Selon ces résultats, les performances en locomotion lors de l'utilisation d'*IRI* sont fortement corrélés aux capacités spatiales des sujets. De plus, les sujets *bons* en capacités spatiales sont meilleurs dans les deux tâches de locomotion comparés aux sujets *faibles*. Par contre, les sujets *bons* ont les mêmes performances avec un grand et un petit écran tandis que les sujets *faibles* ont de meilleures performances avec un grand écran. Enfin, les performances en locomotion amorcée sont supérieures à celles en locomotion naïve pour tous les sujets.

IRI-Manipulation

Dans cette deuxième étude, l'impact des facteurs cognitifs sur les performances dans les tâches de manipulation réalisées avec *IRI* est étudié. Les hypothèses sur cette tâche sont similaires à celles faites pour la locomotion. Les performances devraient être corrélées aux différents indicateurs mesurés, exceptés ceux de la mémoire verbale (*cf.* tableau 6.3.1). De plus, l'implication des fonctions de contrôle et des capacités spatiales devrait être moins importante lors de l'utilisation d'un grand écran. La même démarche statistique que précédemment est adoptée. L'étude des corrélations partielles (*cf.* tableau 6.11) montre que les performances sont corrélées significativement, uniquement à l'indicateur de capacités spatiales. Les bonnes performances des sujets en réalité virtuelle sont associées à de bonnes capacités spatiales. Afin

de préciser l'implication des capacités spatiales dans la performance de manipulation, une ANOVA entre les facteurs *Interface* et *Capacités Spatiales* est calculée sur les performances d'interaction. La variable *Capacités Spatiales* a été construite en séparant les sujets en deux groupes en fonction de la médiane des performances en capacités spatiales. Les statistiques descriptives (moyenne et écart-type) sont proposées dans le tableau 6.13.

		$IRI_{PetitEcran}^{Manipulation}$	$IRI_{GrandEcran}^{Manipulation}$
Capacités	Faibles	$m = 4,25 ; \sigma = 2,54$	$m = 6,02 ; \sigma = 2,77$
Spatiales	Bons	$m = 7,20 ; \sigma = 2,95$	$m = 8,05 ; \sigma = 3,18$

Tableau 6.13 – *Statistiques descriptives pour l'étude IRI-Manipulation en fonction des groupes de capacités spatiales (m : moyenne ; σ : écart-type)*

Les résultats de l'ANOVA indiquent un effet de l'*Interface* [$F(87, 1) = 25,67 ; p < 0,01$] montrant que les performances sont meilleures lors de l'utilisation d'un grand écran. Cet effet est consistant avec celui observé précédemment (section 6.2). Ils indiquent également un effet des *Capacités Spatiales* [$F(87, 1) = 20,16 ; p < 0,01$], selon lequel les performances des sujets ayant de bonnes capacités spatiales ($m = 7,63$) sont meilleures que les sujets ayant de faibles en capacités spatiales ($m = 5,14$) et cela quelle que soit la configuration. Par contre, aucun effet d'interaction n'est observé [$F(87, 1) = 3,26 ; p > 0,05$]. Tous les sujets augmentent leurs performances lors de l'utilisation d'un grand écran.

Ces résultats montrent que dans une tâche de manipulation, les sujets ayant de bonnes capacités spatiales ont de meilleures performances que les sujets ayant de faibles capacités et ceci quelle que soit la taille de l'écran.

CAT-Locomotion

Cette troisième étude s'intéresse aux tâches de locomotion lorsqu'elles sont réalisées avec le *CAT*. Selon les hypothèses, l'utilisation du *CAT* devrait minimiser l'impact des capacités spatiales et des fonctions de contrôle sur la performance. Comme pour les études précédentes, les corrélations partielles entre les performances obtenues en réalité virtuelle dans les tâches de locomotion (réalisées avec le *CAT*) et les facteurs cognitifs sont calculées. Elles sont indiquées dans le tableau 6.11. Seules les capacités spatiales sont corrélées à la tâche de locomotion amorcée. Pour explorer plus précisément l'impact de ce facteur *capacités spatiales*, une ANOVA étudiant l'impact des facteurs *Tâche* et *Capacités Spatiales* sur les performances en réalité virtuelle a été calculée. Les statistiques descriptives de cette ANOVA sont proposées dans le tableau 6.14. Cette ANOVA indique trois effets significatifs. Le premier est l'effet de la *Tâche* [$F(87, 1) = 63,33 ; p < 0,01$]. Il indique que les performances sont meilleures en locomotion amorcée qu'en locomotion naïve. Le deuxième effet est celui des *Capacités Spatiales*

$[F(87, 1) = 8,80 ; p < 0,05]$. Il montre que les performances des sujets *faibles* en capacités spatiales ($m = 48,92$) sont inférieures à celles des sujets *bons* en capacités spatiales ($m = 58,67$). Enfin le dernier effet est celui de l'interaction entre les facteurs *Tâche* et *Capacités Spatiales* $[F(87, 1) = 4,12 ; p < 0,05]$. Cet effet d'interaction montre que la différence de performances entre les sujets bons en capacités spatiales est beaucoup plus importante pour la tâche de locomotion amorcée que pour la tâche de locomotion naïve. De plus, la comparaison des performances entre les deux tâches pour chaque groupe de sujets montre que les performances obtenues sont significativement différentes pour les deux groupes ($[t(43) = 3,68 ; p < 0,01]$ pour les sujets *bons* en capacités spatiales, $[t(43) = 8,38 ; p < 0,01]$ pour les sujets *faibles*). Ces effets sont cohérents avec ceux observés dans l'étude *IRI-Locomotion*.

		$CAT_{MurImmersif}^{LocomotionAmorcee}$	$CAT_{MurImmersif}^{LocomotionNaive}$
Capacités	Faibles	$m = 54,22 ; \sigma = 23,35$	$m = 43,61 ; \sigma = 14,56$
Spatiales	Bons	$m = 67,64 ; \sigma = 17,77$	$m = 49,69 ; \sigma = 12,66$

Tableau 6.14 – *Statistiques descriptives pour l'étude CAT-Locomotion en fonction des groupes de capacités spatiales (m : moyenne ; σ : écart-type)*

Cette analyse nous permet de conclure que les performances dans les tâches de locomotion réalisées avec le *CAT* sont dépendantes des capacités spatiales des sujets.

CAT-Manipulation

Enfin, cette dernière étude traite de l'impact des facteurs cognitifs sur la réalisation de la tâche de manipulation avec le *CAT*. L'étude des corrélations partielles entre les facteurs cognitifs et la performance en manipulation montre que seules les capacités spatiales sont corrélées significativement aux performances. Comme pour les études précédentes, ces corrélations indiquent que les performances des sujets sont reliés à leurs capacités spatiales.

Une synthèse de l'ensemble des résultats obtenus sur les quatre sous-études est présentée dans le tableau 6.15.

6.3.4 Discussion

L'ensemble des résultats, synthétisé dans le tableau 6.6, montre que seules les capacités spatiales sont corrélées aux performances en réalité virtuelle, quelle que soit la tâche ou l'interface utilisée. La revue de la littérature proposée dans le chapitre 4 n'a identifiée que peu d'études s'étant focalisées sur les tâches de locomotion et de manipulation. La majorité des travaux s'est intéressée à la tâche de recherche d'itinéraire (Moffat *et al.*, 1998 ; 2001 ; Cutmore

Etudes	Résultats en termes de performances
<i>IRI-Locomotion</i>	Capacités spatiales \Rightarrow Locomotion sur Petit écran Bons en capacités spatiales > Faibles en capacités spatiales Bons en capacités spatiales, très bons en locomotion amorcée Bons en capacités spatiales : petit écran = grand écran Faibles en capacités spatiales : petit écran < grand écran
<i>IRI-Manipulation</i>	Capacités spatiales \Rightarrow Manipulation sur Petit et Grand écran Bons en capacités spatiales > Faibles en capacités spatiales Bons et Faibles en capacités spatiales : petit écran < grand écran
<i>CAT-Locomotion</i>	Capacités spatiales \Rightarrow Locomotion Amorcée Bons en capacités spatiales > Faibles en capacités spatiales
<i>CAT-Manipulation</i>	Capacités Spatiales \Leftrightarrow Manipulation

Tableau 6.15 – *Synthèse des résultats sur l’impact des caractéristiques cognitives de l’utilisateur*
(\Rightarrow : impliquée dans ; \Leftrightarrow : reliée à)

et al., 2000). Waller (2000) est l’un des seuls auteurs à avoir étudié l’impact des capacités spatiales sur les performances de locomotion. Plus précisément, il s’est intéressé aux performances des utilisateurs lors de l’utilisation d’un joystick pour naviguer dans un labyrinthe virtuel. Il a ainsi montré des corrélations positives entre les performances de locomotion et les capacités spatiales des sujets. Nos résultats permettent de confirmer et de préciser ces résultats et de les étendre à d’autres configurations techniques. En effet, Waller utilisait un joystick et un écran d’ordinateur classique. Nos études, quant à elles, utilisent une interface de type tableau de bord, un nouvel interacteur (le *CAT*) et différentes tailles d’écran. Ces résultats permettent également d’étendre les résultats de Waller à différentes tâches de locomotion (amorcée et naïve) et de manipulation. Les résultats obtenus lors de l’étude des tâches de locomotion amorcée et naïve indiquent que plus la tâche est facile à réaliser, plus les capacités spatiales des utilisateurs ont un impact sur la performance, quelle que soit l’interface utilisée. Nous pouvons donc faire l’hypothèse que lorsque la tâche dépasse un certain seuil de complexité, l’impact des capacités spatiales sur la performance diminue. Cette diminution de l’impact des capacités spatiales entraîne une homogénéisation des performances quelle que soit le niveau d’expertise spatiale.

De plus, les utilisateurs ayant de bonnes capacités spatiales ont des performances similaires, quelle que soit la taille de l’écran. Les utilisateurs ayant de faibles capacités spatiales ont, pour leur part, de meilleures performances avec un grand écran. L’utilisation d’un grand écran pourrait donc faciliter le traitement de l’information spatiale. Les utilisateurs auraient moins besoin de faire appel à leurs capacités spatiales pour être performants. Ce résultat confirme qu’un grand écran est une aide cognitive et qu’il facilite l’interaction pour des utilisateurs

présentant des difficultés spatiales. De nombreux résultats expérimentaux (Linn & Petersen, 1985 ; Voyer *et al.*, 1995) ont, par ailleurs, montré que les femmes étaient souvent en difficultés dans les tâches spatiales. L'utilisation d'un grand écran pourrait alors leur permettre d'avoir de meilleures performances en réalité virtuelle.

Ces résultats expérimentaux indiquent également que les performances ne sont pas significativement corrélées aux fonctions sensorielles, motrices, mnésiques et de contrôle. En se basant sur les modèles du traitement de l'information classiquement utilisés en interaction homme-machine, nous avons fait l'hypothèse que les différentes étapes de traitement pouvaient influencer la performance en réalité virtuelle. Nos travaux semblent contredire cette hypothèse. Cette contradiction peut, cependant, être due au choix des tests d'évaluation des fonctions cognitives. En effet, les tests utilisés dans cette expérience sont essentiellement basés sur du matériel visuo-spatial. Il en résulte de très fortes corrélations entre les indicateurs des différentes fonctions cognitives (*cf.* tableau 6.10). Un panel plus large ou plus diversifié d'évaluations cognitives, notamment au niveau des fonctions de contrôle ou des habilités sensori-motrice, pourraient permettre d'identifier d'autres facteurs cognitifs impliqués dans la performance d'interaction. L'absence de corrélation entre les fonctions cognitives (autres que les capacités spatiales) et les performances en réalité virtuelle peut aussi être due à l'utilisation des corrélations partielles. En effet, la matrice des corrélations simples (*cf.* tableau 6.10) montrent des corrélations fortes entre les performances en réalité virtuelle et les fonctions cognitives. Les fonctions de contrôle, par exemple, sont corrélées à l'ensemble des performances en réalité virtuelle. Pour montrer le lien entre une fonction cognitive particulière et le niveau de performance, il est donc primordial de contrôler l'impact des autres fonctions cognitives (notamment des capacités spatiales) sur la performance. Les travaux antérieurs mentionnés dans le chapitre 4, se focalisent essentiellement sur une seule fonction cognitive et ne contrôlent pas systématiquement l'impact des autres fonctions. Aux vues des résultats de cette expérience, les conclusions de ces études doivent être nuancées.

Cette expérimentation met en relief l'impact des capacités spatiales sur les performances en locomotion et manipulation. Ces capacités spatiales ont un impact sur des tâches et des interfaces différentes. Les résultats de ces expériences permettent de confirmer qu'un grand écran peut être une aide cognitive pour faciliter l'interaction des utilisateurs ayant des difficultés spatiales.

Pour compléter cette étude des caractéristiques de l'utilisateur, nous nous focalisons sur l'impact du niveau d'expérience et de la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur la performance d'interaction.

6.4 *Expérience, style cognitif et performances*

Dans cette étude, nous nous intéressons également à deux autres facteurs pouvant avoir un impact sur la performance en réalité virtuelle : l'expérience dans la tâche et la dépendance-indépendance à l'égard du champ. Dans le chapitre 4, différents travaux expérimentaux ont été introduits. Ils mettent notamment en exergue les relations étroites qu'entretiennent l'expérience dans la tâche, la dépendance-indépendance à l'égard du champ, le sexe des utilisateurs et la performance d'interaction en réalité virtuelle. Dans cette expérience, l'effet du sexe est contrôlé en conservant dans la population des sujets une répartition homogène (cinquante pour cent d'hommes et cinquante pour cent de femmes). Comme pour les sections précédentes, les hypothèses sont introduites, puis les évaluations utilisées et enfin les résultats et leurs discussions.

6.4.1 *Hypothèses*

Les hypothèses sur l'impact de l'expérience des utilisateurs dans la tâche sur les performances en réalité virtuelle seront présentées suivies des hypothèses concernant l'impact de la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur ces mêmes performances.

Expérience des utilisateurs dans la tâche

L'expérience des utilisateurs dans la tâche est un critère souvent mentionné comme influençant la performance en interaction homme-machine (Egan, 1988 ; Nielsen *et al.*, 1993 ; Dix *et al.*, 1998 ; Boy, 2003). Ces résultats ont été confirmés par Moffat *et al.* (2001) en réalité virtuelle. L'ensemble de ces auteurs s'accorde pour montrer que plus les utilisateurs sont expérimentés dans la tâche, meilleures sont leurs performances. Les applications de réalité virtuelle accessibles au grand public étant essentiellement les applications de jeux vidéo, nous avons fait le choix de nous focaliser sur l'impact de l'expérience en jeux vidéo (utilisant des environnements tridimensionnels). L'interaction dans la majorité des jeux vidéo est basée sur le contrôle du point de vue d'un personnage. Les joueurs de jeux vidéo devraient donc être meilleurs en locomotion que les non joueurs. Par contre, cela ne sera pas nécessairement vrai pour les tâches de manipulation. De plus, les joueurs sont habitués à des interfaces de type tableau de bord, visualisées sur un petit écran. Ils devraient donc être plus performants lors de l'utilisation d'un petit écran. Le fonctionnement du *CAT* n'étant pas similaire à celui des jeux vidéo, les joueurs ne devraient pas être avantagés. Une synthèse de ces hypothèses est proposée dans le tableau 6.16.

Dépendance-indépendance à l'égard du champ

De nombreux travaux (Boyd, 1995 ; Stanney *et al.*, 1998 ; Salzman *et al.*, 1999a ; Pasquier *et al.*, 1999 ; Fuchs & Moreau, 2003 ; Brouwer, 2005) supposent un impact de ce facteur sur la performance en réalité virtuelle. Brouwer (2005) suppose que les sujets indépendants à l'égard du champ devraient être plus performants que les sujets dépendants. Cette supposition a été validée par Ogle (2002) pour les tâches de manipulation, mais pas pour les tâches de locomotion. Nous avons mentionné précédemment que l'utilisation préférentielle d'un système de référence égocentrique ou exocentrique dépendait des caractéristiques de la tâche mais également des caractéristiques des utilisateurs et notamment de la dépendance-indépendance à l'égard du champ. Les sujets indépendants à l'égard du champ devraient donc réaliser les tâches avec une stratégie égocentrique, tandis que les sujets dépendants devraient utiliser une stratégie exocentrique. Cette hypothèse est toutefois à nuancer car les sujets indépendants à l'égard du champ sont plus aptes à changer de système de référence et donc à utiliser un système exocentrique (Huteau, 1987). Les sujets indépendants à l'égard du champ devraient donc être meilleurs quelle que soit la tâche. A l'inverse, les sujets dépendants devraient être davantage en difficulté sur les tâches de locomotion (qui est égocentrique) que sur celle de manipulation (qui est exocentrique).

Dans ces travaux sur les grands écrans, Tan *et al.* (2003) ont supposé qu'un grand écran permettait de soutenir la mise en place d'une stratégie égocentrique. Les sujets indépendants à l'égard du champ, utilisant déjà une stratégie égocentrique, ne devraient donc pas profiter d'un grand écran. Par contre, pour les sujets dépendants, un grand écran pourrait soutenir la mise en place d'une stratégie égocentrique et permettre une amélioration des performances en locomotion. Le grand écran ne devrait pas faciliter la réalisation de la tâche de manipulation quel que soit le style cognitif des sujets.

Une synthèse de l'ensemble de ces hypothèses est présentée dans le tableau 6.16. Les tests utilisés pour évaluer l'expérience en jeux vidéo et la dépendance-indépendance à l'égard du champ sont maintenant décrits.

6.4.2 Evaluation de l'utilisateur

Les tests utilisés pour évaluer l'expérience en jeux vidéo et la dépendance-indépendance à l'égard du champ sont présentés. Ces deux tests ont été complétés en même temps que les évaluations cognitives. La complétion de ces deux tests demande environ 20 minutes.

Etudes	Hypothèses en termes de performances
<i>IRI-Locomotion</i>	Indépendant >> Dépendant Dépendants sur Petit Ecran < Dépendants sur Grand Ecran Joueur > Non Joueur Joueur sur Petit Ecran > Joueur sur Grand Ecran
<i>IRI-Manipulation</i>	Indépendant > Dépendant Dépendants sur Petit Ecran = Dépendants sur Grand Ecran Joueur = Non joueur
<i>CAT-Locomotion</i>	Indépendant > Dépendant Joueur = Non joueur
<i>CAT-Manipulation</i>	Indépendant > Dépendant Joueur = Non joueur

Tableau 6.16 – *Hypothèses sur l’impact de l’expérience en jeux vidéo et de la dépendance-indépendance du champ sur les performances*

Expérience en jeux vidéo

A notre connaissance, il n’existe pas de test standardisé mesurant l’expertise en jeux vidéo, nous avons proposé une mesure pour l’estimer. Les jeux vidéo sur ordinateur présentent un certain nombre de propriétés : faible durée de vie²², diversité, multiplicité des jeux, des techniques d’interaction, des environnements tridimensionnels (Frété, 2002 ; Lucas & Sherry, 2004) *etc.* L’estimation du temps passé à jouer, quel que soit le jeu, semble être une bonne méthode d’évaluation du niveau d’expérience. Les deux questions suivantes ont été posées aux sujets : *Combien de temps passez vous en moyenne devant vos jeux vidéo par semaine (en heures) ? Combien de temps passiez vous à jouer au maximum de votre pratique (en heures) ?* Les sujets étaient informés que seuls les jeux vidéo utilisant des environnements tridimensionnels étaient concernés. Les deux réponses ont été sommées. Une méthode similaire a notamment été utilisée par Lucas & Sherry (2004). La population a ensuite été séparée en deux groupes pour construire un indicateur d’expérience en jeux vidéo (noté *Jeux Vidéo*). Les sujets ayant des performances au dessus de la médiane sont considérés comme des sujets *Joueurs*, tandis que les sujets ayant des performances en dessous de la médiane sont des sujets *Non Joueurs*.

Dépendance-indépendance à l’égard du champ

Le *Group Embedded Figure Test GEFT* (Oltman *et al.*, 1971) a été utilisé pour évaluer la dépendance-indépendance à l’égard du champ. Ce test papier-crayon a été utilisé en réalité virtuelle (Pasquier *et al.*, 1999 ; Ogle, 2002), mais il l’a surtout été pour étudier les stratégies

22. Certains joueurs peuvent terminer un jeu en quelques heures ou en quelques jours (Fries, 2003).

d'exploration des pages web (Chen & Macredie, 2002 ; Palmquist & Kim, 2000 ; Kim, 2001). Dans ce test, le sujet doit identifier des formes simples imbriquées dans des formes complexes. Le score du sujet est le nombre de figures simples correctement identifiées dans les formes complexes. Le score total maximum est 18. Plus le score est élevé, plus le sujet est considéré comme indépendant au champ. Ce test est reconnu comme étant fortement corrélé aux performances académiques. En effet les étudiants en cursus scientifiques ont souvent de meilleurs scores que des étudiants en cursus littéraires (Tinajero & Paramo, 1997 ; Clark *et al.*, 2000 ; Pithers, 2002). La population recrutée, étant essentiellement des étudiants en cursus scientifique, le temps de passation de l'épreuve a été réduit pour la rendre plus discriminante. Le sujet dispose donc de 3 minutes (au lieu de 5) pour chaque série de 9 figures (le test comporte 2 séries). Comme pour l'indicateur d'expérience en jeux vidéo, une variable à deux modalités, notée *DIC* a été construite. Le groupe au dessus de la médiane a été défini comme *IC* pour indépendants à l'égard du champ, le groupe en dessous a été défini comme *DC* pour dépendants à l'égard du champ.

6.4.3 Résultats expérimentaux

Les variables *Jeux Vidéo* et *DIC* sont des variables discrètes à deux modalités. Afin d'étudier la distribution des effectifs entre ces deux variables, un χ^2 entre l'expérience en jeux vidéo et la *DIC* a été calculé [$\chi^2(1) = 1,65 ; p > 0,05$]. Ce χ^2 n'est pas significatif. Par contre, le χ^2 entre le sexe des sujets et leur niveau d'expérience en jeux vidéo est significatif [$\chi^2(1) = 33,44 ; p < 0,01$], de même que celui entre le sexe et la *DIC* [$\chi^2(1) = 3,86 ; p < 0,05$]. Le premier signifie que les sujets joueurs en jeux vidéo sont essentiellement des hommes, tandis que les sujets non joueurs sont essentiellement des femmes. Le second montre que les sujets indépendants à l'égard du champ sont essentiellement des hommes. Ces deux résultats confirment l'impact du sexe sur l'ensemble des variables étudiées et donc la difficulté de l'étudier. Dans cette étude, le sexe est contrôlé puisque la répartition des hommes et des femmes est homogène.

Comme précédemment, les quatre sous-études *IRI-Locomotion*, *IRI-Manipulation*, *CAT-Locomotion* et *CAT-Manipulation* sont traitées successivement. Pour chacune de ces études, les interactions entre les tâches, les interfaces, l'expérience en jeux vidéo et la dépendance-indépendance à l'égard du champ sont analysées. Les statistiques descriptives représentant l'ensemble de ces interactions sont présentées dans le tableau 6.17. A la vue de la complexité des analyses, uniquement les résultats significatifs seront indiqués.

		$IRI_{PetitEcran}^{Manipulation}$	$IRI_{GrandEcran}^{Manipulation}$	$CAT_{MurImmersif}^{Manipulation}$	$IRI_{PetitEcran}^{LocoAmorcee}$	$IRI_{GrandEcran}^{LocoAmorcee}$	$CAT_{MurImmersif}^{LocoAmorcee}$	$IRI_{PetitEcran}^{LocoNaive}$	$IRI_{GrandEcran}^{LocoNaive}$	$CAT_{MurImmersif}^{LocoNaive}$
Non Joueurs	DC	$m = 3,40$ $\sigma = 2,75$	$m = 4,52$ $\sigma = 2,74$	$m = 15,84$ $\sigma = 6,45$	$m = 12,26$ $\sigma = 8,03$	$m = 14,66$ $\sigma = 7,21$	$m = 41,32$ $\sigma = 23,80$	$m = 8,18$ $\sigma = 5,38$	$m = 11,15$ $\sigma = 3,58$	$m = 37,69$ $\sigma = 15,58$
	IC	$m = 6,22$ $\sigma = 3,35$	$m = 8,39$ $\sigma = 3,07$	$m = 21,39$ $\sigma = 6,14$	$m = 18,47$ $\sigma = 10,28$	$m = 18,29$ $\sigma = 11,16$	$m = 68,37$ $\sigma = 11,48$	$m = 12,27$ $\sigma = 3,23$	$m = 12,45$ $\sigma = 1,69$	$m = 49,11$ $\sigma = 12,50$
Joueurs	DC	$m = 5,90$ $\sigma = 2,45$	$m = 7,10$ $\sigma = 2,63$	$m = 21,70$ $\sigma = 6,62$	$m = 17,92$ $\sigma = 6,94$	$m = 18,69$ $\sigma = 7,66$	$m = 70,94$ $\sigma = 8,34$	$m = 12,07$ $\sigma = 2,67$	$m = 13,07$ $\sigma = 2,36$	$m = 50,10$ $\sigma = 10,21$
	IC	$m = 7,56$ $\sigma = 2,35$	$m = 8,52$ $\sigma = 2,37$	$m = 24,36$ $\sigma = 6,39$	$m = 21,94$ $\sigma = 10,34$	$m = 23,35$ $\sigma = 11,12$	$m = 67,18$ $\sigma = 20,66$	$m = 12,75$ $\sigma = 2,37$	$m = 11,73$ $\sigma = 2,47$	$m = 51,09$ $\sigma = 12,11$

Tableau 6.17 – Performances des sujets en fonction de la tâche, de l'interface, de l'expérience en jeux vidéo et de la dépendance-indépendance à l'égard du champ (m : moyenne ; σ : écart-type)

IRI-*Locomotion*

Cette première étude s'intéresse à la réalisation des tâches de locomotion avec *IRI* en utilisant soit un petit écran, soit un grand écran. D'après les hypothèses, les performances des sujets indépendants devraient être supérieures à celles des sujets dépendants. En outre, les sujets dépendants devraient avoir de meilleures performances avec un grand écran qu'avec un petit écran. Enfin, les sujets joueurs en jeux vidéo devraient être meilleurs que les sujets non joueurs. L'utilisation d'un petit écran devrait permettre aux joueurs d'avoir un bon niveau de performances (*cf.* tableau 6.16).

Pour tester ces hypothèses, une ANOVA à quatre facteurs *Interface*, *Tâche*, *Jeux Vidéo* et *DIC* sur les performances d'interaction a été calculée. Les résultats de cette analyse montrent trois effets simples.

Le premier est celui de la *Tâche* [$F(87, 1) = 64,49 ; p < 0,01$]. Il montre que les performances en locomotion amorcée ($m = 18,2$) sont supérieures aux performances en locomotion naïve ($m = 11,7$). Le deuxième effet est celui de l'expérience en *Jeux Vidéo* [$F(87, 1) = 7,80 ; p < 0,01$]. Cet effet montre que les sujets qui jouent aux jeux vidéo sont plus performants ($m = 16,44$) que les sujets qui ne jouent pas ($m = 13,48$). Le troisième effet simple est celui de la *DIC* [$F(87, 1) = 7,57 ; p < 0,01$]. Il indique que les performances des sujets *DC* sont inférieures ($m = 13,50$) aux performances des sujets *IC* ($m = 16,42$). Nous pouvons noter une tendance sur l'effet de l'*Interface* [$F(87, 1) = 3,55 ; p = 0,06$] qui montre que les sujets semblent être plus performants sur un grand écran que sur un petit écran.

Deux effets d'interaction peuvent également être notés : une interaction entre le facteur *Tâche* et le facteur *DIC* [$F(87, 1) = 4,51 ; p < 0,05$] et une interaction entre le facteur *Tâche* et le facteur *Jeux Vidéo* [$F(87, 1) = 3,91 ; p = 0,05$]. Les deux effets sont similaires. Ainsi, le premier indique que les sujets *DC* sont beaucoup plus faibles que les sujets *IC* en locomotion amorcée quelle que soit la taille de l'écran ($m = 15,88$ pour les *DC* ; $m = 20,51$ pour les *IC*), tandis qu'ils sont seulement légèrement plus faibles que les sujets *IC* en locomotion naïve ($m = 11,12$ pour les *DC* ; $m = 12,33$ pour les *IC*). Le second effet indique que les sujets *Non joueurs* sont beaucoup moins performants en locomotion amorcée que les sujets *Joueurs* ($m = 15,92$ pour les *Non Joueurs* ; $m = 20,48$ pour les *Joueurs*) tandis qu'ils sont légèrement moins performants en locomotion naïve ($m = 11,04$ pour les *Non Joueurs* ; $m = 12,41$ pour les *Joueurs*).

Ces résultats, résumés dans le tableau 6.18, montrent que les sujets indépendants à l'égard du champ ou joueurs sont meilleurs que les sujets dépendants ou non joueurs. De plus, si

les sujets sont joueurs en jeux vidéo ou indépendants à l'égard du champ, alors leurs performances sont très bonnes en locomotion amorcée. L'expérience dans la tâche et la dépendance-indépendance à l'égard du champ sont donc être impliquées dans la performance de locomotion, d'autant plus si la tâche est facile à réaliser. Par contre, ces résultats ne confirment pas l'hypothèse sur l'impact positif d'un grand écran pour les sujets dépendants à l'égard du champ.

IRI-Manipulation

Cette sous-étude traite de l'impact de l'expérience en jeux vidéo et de la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur la performance en manipulation lors de l'utilisation d'*IRI*. Nous avons fait l'hypothèse que les indépendants à l'égard du champ seraient plus performants que les sujets dépendants et que la taille de l'écran ne devrait pas interagir avec ce facteur. De plus, les joueurs et les non joueurs devraient avoir des performances similaires. Une ANOVA à 3 facteurs *Interface*, *Jeux Vidéo* et *DIC* a été calculée sur les performances en réalité virtuelle pour tester ces hypothèses. Les résultats indiquent un effet de l'*Interface* [$F(87, 1) = 26,58 ; p < 0,01$], montrant que les performances en manipulation sont meilleures sur un grand écran ($m = 7,13$) que sur un petit écran ($m = 5,77$). Cette ANOVA indique également un effet de l'expérience en *Jeux Vidéo* [$F(87, 1) = 9,98 ; p < 0,01$] et un effet de la *DIC* [$F(87, 1) = 22,21 ; p < 0,01$]. Ces deux effets sont congruents avec ceux observés en locomotion : les sujets *IC* ou *Joueurs* en jeux vidéo sont meilleurs que les sujets *DC* ou *Non Joueurs*.

Par conséquent, ces résultats (*cf.* tableau 6.18) montrent l'impact de la dépendance-indépendance à l'égard du champ et de l'expérience en jeux vidéo sur la performance en manipulation. Ils infirment nos hypothèses sur les interactions entre la taille de l'écran et la dépendance-indépendance à l'égard du champ.

CAT-Locomotion

Dans cette troisième étude, l'impact de l'expérience en jeux vidéo et de la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur la locomotion lors de l'utilisation du *CAT* est étudié. Selon les hypothèses, les performances des sujets indépendants devraient être supérieures à celles des sujets dépendants. Par contre, l'expérience en jeux vidéo ne devrait pas avoir d'impact sur la performance. Une ANOVA à 3 facteurs *Tâche*, *Jeux Vidéo* et *DIC* a été calculée. Cette analyse montre un effet de la *Tâche* [$F(87, 1) = 75,98 ; p < 0,01$] et une interaction entre les facteurs *Tâche* et *Jeux Vidéo* [$F(87, 1) = 4,19 ; p < 0,05$]. Ces deux effets sont similaires à ceux observés pour *IRI*. Les performances sont meilleures en locomotion amorcée qu'en locomotion naïve et les performances des sujets *Joueurs* sont largement supérieures en

locomotion amorcée comparées à celles des sujets *Non joueurs*. Cette analyse montre également un effet de l'expérience en jeux vidéo [$F(87, 1) = 13,51 ; p < 0,01$] et un effet de la *DIC* [$F(87, 1) = 9,4 ; p < 0,01$]. Ces deux effets sont cohérents avec ceux observés précédemment. Les résultats indiquent aussi une interaction entre les facteurs *Jeux Vidéo* et *DIC* [$F(87, 1) = 12,53 ; p < 0,01$]. Les sujets *Joueurs* quel que soit leur style cognitif ont de bonnes performances en locomotion ($m = 60,52$ pour les *DC*, $m = 59,14$ pour les *IC*) et les sujets *IC*, quelle que soit leur expérience en jeux vidéo, ont également de bonnes performances ($m = 58,74$ pour les *Non Joueurs*, $m = 59,14$ pour les *Joueurs*). Seul, les sujets *DC* ne jouant pas aux jeux vidéo ont de faibles performances en locomotion ($m = 39,50$). La triple interaction entre les facteurs *Tâche*, *Jeux Vidéo* et *DIC* [$F(87, 1) = 8,83 ; p < 0,01$] confirment les résultats précédents.

Ces résultats montrent l'impact de l'interaction entre la dépendance-indépendance à l'égard du champ et l'expérience en jeux vidéo sur la performance en locomotion. Ainsi l'expérience en jeux vidéo ou l'indépendance à l'égard du champ peuvent permettre de maintenir un haut niveau de performances en locomotion lors de l'utilisation du *CAT* (*cf.* tableau 6.18).

CAT-Manipulation

Enfin, cette dernière étude se focalise sur l'impact de la dépendance-indépendance à l'égard du champ et de l'expérience en jeux vidéo sur la performance en manipulation lors de l'utilisation du *CAT*. Selon nos hypothèses, les joueurs et les non joueurs en jeux vidéo devraient avoir des performances similaires, par contre les sujets indépendants devraient être plus performants que les sujets dépendants. Une ANOVA sur la performance des sujets en manipulation lors de l'utilisation du *CAT* a été calculée. Cette ANOVA montre un effet de la *DIC* [$F(87, 1) = 8,84 ; p < 0,05$] et un effet de l'expérience en jeux vidéo [$F(87, 1) = 10,23 ; p < 0,05$]. Ces deux effets sont cohérents avec ceux observés précédemment : les sujets *IC* sont plus performants que les sujets *DC* et les sujets *Joueurs* sont meilleurs que les sujets *Non joueurs*. Une synthèse de l'ensemble des résultats est présentée dans le tableau 6.18.

6.4.4 Discussion

D'après les résultats expérimentaux présentés précédemment, quelle que soit la tâche étudiée et l'interface utilisée, les utilisateurs jouant aux jeux vidéo sont meilleurs que les non joueurs. Les utilisateurs indépendants à l'égard du champ sont plus performants que les utilisateurs dépendants.

Ces résultats sont, en partie, en accord avec nos hypothèses. Cependant, nous avons

Études	Résultats en termes de performances
<i>IRI-Locomotion</i>	Indépendants > Dépendants
	Joueurs > Non Joueurs
	Joueurs, très bons en locomotion amorcée
	Indépendants, très bons en locomotion amorcée
<i>IRI-Manipulation</i>	Indépendants > Dépendants
	Joueurs > Non Joueurs
<i>CAT-Locomotion</i>	Indépendants > Dépendants
	Joueurs > Non Joueurs
	Joueurs, très bons en locomotion amorcée
<i>CAT-Manipulation</i>	Indépendants > Dépendants
	Joueurs > Non Joueurs

Tableau 6.18 – Résultats sur l’impact des jeux vidéo et la dépendance-indépendance à l’égard du champ sur la performance

supposé l’existence d’interaction entre la taille de l’écran et l’expérience en jeux vidéo ou la dépendance-indépendance à l’égard du champ. Nous supposons également un impact minime de ces deux facteurs sur l’interaction avec le *CAT*. Ces hypothèses ne sont pas vérifiées.

En ce qui concerne l’expérience en jeux vidéo, nous avons fait l’hypothèse que dans la mesure où le grand écran et le *CAT* ne sont pas des interfaces habituelles pour les joueurs de jeux vidéo, les performances des sujets auraient dû être meilleures avec un petit écran. L’expérience en jeux vidéo n’aurait pas du influencer les performances d’interaction avec le *CAT*. Cependant il semblerait que l’habitude des joueurs de jeux vidéo à utiliser des environnements tridimensionnels, leur permet de maintenir un haut niveau de performance, quel que soit le type d’interface utilisée. La même analyse peut être faite pour la tâche de manipulation. En effet, bien que cette tâche ne soit pas fréquemment utilisée dans les jeux vidéo, les joueurs sont performants. Lors de l’étude de l’impact des capacités spatiales, nous avons montré que plus la tâche est facile à réaliser plus les performances sont bonnes. Nous retrouvons un effet similaire dans cette étude, où les joueurs en jeux vidéo ou indépendants à l’égard du champ sont très performants en locomotion amorcée.

Concernant la dépendance-indépendance à l’égard du champ, un gain de performance aurait dû être observé lors de l’utilisation d’un grand écran pour les sujets dépendants à l’égard du champ et pas nécessairement pour les sujets indépendants. En effet, d’après les travaux de Tan *et al.* (2003), développés dans la section 6.2, un grand écran soutiendrait la mise en place par le sujet d’une stratégie égocentrique et donc devrait soutenir la mise en place de cette stratégie pour les sujets dépendants à l’égard du champ. Nos résultats ne nous permettent pas de confirmer cette hypothèse puisqu’ils indiquent un gain de performances avec

un grand écran pour tous les sujets (joueurs et non joueurs, indépendants et dépendants). Au contraire des capacités spatiales, la dépendance-indépendance et l'expérience en jeux vidéo ne permettent pas d'expliquer le gain de performances observé lors de l'utilisation d'un grand écran. Cette conclusion, comme celle montrant un impact positif d'un grand écran sur une tâche de manipulation (*cf.* section 6.2), nous amène à remettre en cause l'hypothèse de Tan *et al.* (2003) selon laquelle un grand écran soutiendrait une stratégie égocentrique. Par contre, les résultats précédents sur les capacités spatiales, nous amènent à proposer qu'un grand écran faciliterait le traitement de l'information spatiale et donc diminuerait le coût cognitif de l'interaction.

6.5 Synthèse

Dans ce chapitre, une série de résultats expérimentaux vient d'être présentée. Ces résultats ont permis de mettre en relief plusieurs points : l'impact positif d'un grand écran sur la performance et l'influence des capacités spatiales, de l'expérience en jeux vidéo et de la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur cette même performance. L'existence de cette expérimentation permet de compléter les études de Tan et de ses collaborateurs (Tan *et al.*, 2003 ; 2004 ; Tan, 2004) en ce qui concerne l'impact positif des grands écrans sur la performance. Nos résultats montrent essentiellement qu'un grand écran permet de faciliter le traitement de l'information spatiale. Ainsi, les sujets ayant des difficultés spatiales profitent d'un grand écran, tandis que les sujets ayant de bonnes capacités spatiales ont des performances similaires avec un petit et un grand écran. Par contre, ces travaux ne permettent pas de vérifier l'hypothèse de Tan selon laquelle un grand écran soutiendrait la mise en place d'une stratégie égocentrique. En effet, un grand écran est bénéfique dans les tâches requérant une stratégie exocentrique (la manipulation) et ne profite pas aux sujets dépendants à l'égard du champ qui utilisent préférentiellement une stratégie exocentrique. L'utilisation d'un grand écran pour soutenir l'utilisation d'un référentiel égocentrique dans les tâches de locomotion, comme nous le relevons dans le chapitre précédent, semble donc peu pertinente.

Dans notre étude, les performances des utilisateurs ont été mesurées avec deux interfaces, *IRI* et le *CAT* et sur différentes tâches, variant en difficulté. Bien que ces deux interfaces soient totalement différentes, les résultats obtenus sont homogènes : les capacités spatiales, l'expérience en jeux vidéo et la dépendance-indépendance à l'égard du champ ont le même impact sur la performance quelle que soit l'interface. Des expérimentations complémentaires sur d'autres interfaces doivent être menées pour confirmer cette homogénéité, et le cas échéant, identifier les facteurs cognitifs influençant la performance en fonction de ces interfaces.

Enfin, il est important de souligner un dernier point, le groupe des sujets joueurs en jeux

vidéo est essentiellement constitué d'hommes tandis que le groupe des non joueurs est essentiellement constitué de femmes. De même, les sujets indépendants à l'égard du champ sont essentiellement des hommes tandis que les sujets dépendants sont surtout des femmes. Pour compléter ces résultats, nous notons que le χ^2 entre les groupes de capacités spatiales et le sexe [$\chi^2(1) = 9,08; p < 0,01$] est significatif, de même que celui entre les groupes de capacités spatiales et les groupes d'expérience en jeux vidéo [$\chi^2(1) = 5,50; p < 0,05$]. Les mêmes résultats sont obtenus entre les groupes de capacités spatiales et les groupes de sujets dépendants et indépendants [$\chi^2(1) = 13,14; p < 0,01$]. Ces résultats mettent en avant l'existence de profil d'utilisateurs. Les utilisateurs performants en réalité virtuelle sont des individus ayant de bonnes capacités spatiales, indépendants à l'égard du champ, joueurs de jeux vidéo et des hommes. Les utilisateurs moins performants sont des individus ayant de faibles capacités spatiales, dépendants à l'égard du champ, non joueurs en jeux vidéo et des femmes. De plus, cette étude souligne que les utilisateurs performants sont d'autant plus performants sur les tâches faciles et que les utilisateurs moins performants profitent d'un grand écran. L'identification d'un tel profil est particulièrement intéressante dans le cadre applicatif. Il doit permettre d'adapter la visualisation en fonction du profil de l'utilisateur. Nous reviendrons sur ce dernier point en présentant les perspectives de nos travaux dans le chapitre 7.

CHAPITRE 7

Synthèse et Perspectives

En introduction de ce travail, nous avons souligné l'un des problèmes cruciaux de la réalité virtuelle : proposer des interfaces adaptées à la tâche à réaliser. L'étude exhaustive de ces interfaces n'étant pas envisageable, nos recherches se sont concentrées sur deux configurations d'interaction particulières : celles impliquant des écrans d'ordinateurs, des souris, des boutons interactifs et celles basées sur l'utilisation de murs immersifs (d'une vingtaine de mètres carrés), d'interacteurs dédiés tel que le *CAT* et ayant pour vocation de permettre à plusieurs utilisateurs d'interagir avec une application de réalité virtuelle. Ces deux types d'interaction sont particulièrement intéressants. En effet, ils demandent à l'utilisateur de contrôler la position du point de vue (au contraire des visiocasques) et au concepteur de proposer une technique d'interaction adaptée. Cette dernière n'étant pas nécessairement dépendante d'un schème puisque l'utilisation des schèmes sensori-moteurs est rarement possible dans ces configurations. Il est, en effet, difficile d'interagir avec un tapis roulant devant un petit écran. Un tel tapis peut être pertinent face à un mur immersif, mais il n'est pas adapté à une utilisation collective. Pour se déplacer, chaque utilisateur devrait monter sur le tapis, se déplacer, en redescendre *etc.*

Dans cette recherche, nous nous sommes focalisés sur l'adaptation de ces deux configurations à la tâche à réaliser. Cette adaptation passe par une réflexion selon deux axes : la tâche et l'utilisateur. Ces deux axes ont été développés d'un point de vue théorique (chapitre 1

à 4), mais également expérimental (chapitres 5 et 6). Dans ce dernier chapitre, les principaux résultats et les perspectives sont présentés pour chacun de ces axes de recherche.

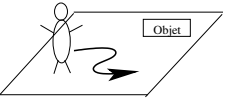
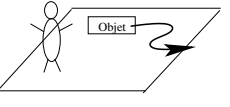
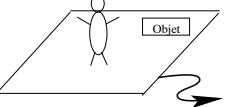
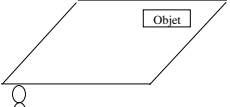
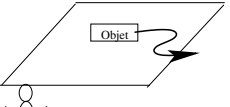
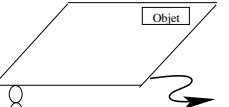
7.1 *La tâche*


Concernant la tâche, deux axes de recherche ont été explorés. En effet, nous avons d'une part proposé un modèle de l'interaction en fonction des propriétés des environnements réels et virtuels, d'autre part étudié la gestion par l'utilisateur des référentiels spatiaux (égocentrique *vs.* exocentrique).


7.1.1 *Modèle de l'interaction*


En nous basant sur la théorie instrumentale de Rabardel (1995), adaptée à la réalité virtuelle par Fuchs & Burkhardt (2003), nous avons mis en avant la nécessité d'étudier les processus d'utilisation des interfaces. Ces processus s'expriment essentiellement lors des tâches primitives d'interaction, la locomotion (composante motrice de la navigation) et la manipulation. Dans une perspective utilisateur, ces deux tâches ont fait l'objet de peu d'études, la majorité s'étant focalisée sur la composante cognitive de la navigation : la recherche d'itinéraire. Dans ces tâches de locomotion et de manipulation, l'une des principales difficultés pour l'utilisateur est de se construire une représentation correcte des positions et des orientations de son point de vue et de l'environnement virtuel en fonction de ses actions sur l'interacteur moteur. En effet, l'utilisateur doit associer à la manipulation de l'interacteur, le déplacement de son point de vue ou d'un objet dans l'environnement. Pour explorer cette question, les différences et les similitudes existant entre les environnements réels et virtuels ont été étudiées. Cette analyse comparative a permis de proposer un modèle de l'interaction mettant en exergue un certain nombre de points clés sur lesquels une attention particulière devra être portée lors de l'élaboration d'une interface. Ces points clés résultent essentiellement de la position du point de vue (intérieur *vs.* extérieur) par rapport à celle de la scène tridimensionnelle et du référentiel du mouvement utilisé (le point de vue, l'objet ou la scène). Ils sont résumés sur la figure 7.1.

Ce modèle de l'interaction doit faire l'objet de travaux complémentaires afin de le valider et de l'adapter à différents interacteurs sensoriels (par exemple des visiocasques) et moteurs (utilisation continue ou discrète des 6 degrés de liberté). Pour chaque problème soulevé, le concepteur peut soit contraindre les mouvements en environnement virtuel à ceux possibles en environnement réel (comme c'est le cas dans *IRI*), soit proposer des aides à l'utilisateur (par exemple un retour haptique comme pour le *CAT*). Dans le chapitre 5, des exemples d'aides pouvant permettre à l'utilisateur de connaître les positions et orientations relatives de

REFERENTIEL du MOUVEMENT REFERENTIEL du POINT de VUE	CAMERA POINT DE VUE	OBJET	SCENE
INTERIEUR	 LOCOMOTION Difficultés : Orientation du point de vue	 MANIPULATION Difficultés : Objet éloigné du point de vue	 MANIPULATION Difficultés : Orientation et positionnement de la scène
EXTERIEUR	 LOCOMOTION Difficultés : Orientation et positionnement du point de vue	 MANIPULATION Difficultés : Objet éloigné du point de vue	 MANIPULATION Difficultés : Scène éloignée du point de vue


 Point de vue de l'utilisateur


 Scène


 Objet



 Mouvement

Figure 7.1 – Difficultés pour l'utilisateur en fonction de sa configuration spatiale

son point de vue et de la scène, ont été proposés. Des études d'utilisabilité de ces aides doivent être menées afin d'en préciser la pertinence en fonction du type d'application, des interacteurs utilisés, de la densité d'information contenue dans l'environnement virtuel *etc.*

L'une des nos perspectives principales concernant ce modèle de l'interaction est de l'adapter et de le valider pour les terminaux mobiles communicants tels que les téléphones portables, les assistants personnels électroniques. En effet, ces technologies ont la particularité de proposer des écrans de très petite taille (quelques centimètres carrés), il convient donc d'adapter l'interaction en fonction de cette dimension. Ainsi, par exemple, nous pouvons penser que toute configuration d'interaction où le point de vue sera positionné à l'extérieur de la scène ne sera pas pertinente. Une telle configuration signifierait une visibilité minimale de la scène sur l'écran. Les conséquences directes sont que notre modèle de l'interaction adapté à ces terminaux ne contiendrait plus six configurations mais trois (toutes les configurations où le point de vue est extérieur ayant été supprimées). De plus, nous avons démontré que la configuration, où le point de vue est à l'intérieur de la scène et que le référentiel du mouvement est cette scène, peut être très perturbatrice pour l'utilisateur, il faut donc soit la contraindre

(notamment en l'interdisant), soit proposer des aides visuelles à l'utilisateur. Dans le cas des terminaux mobiles communicants, la petite taille de l'écran limite les aides visuelles qu'il est possible de fournir. La solution pourrait être d'interdire cette configuration. Il en résulte, que le modèle de l'interaction peut se limiter à deux configurations d'interaction (la manipulation d'un objet et celle du point de vue). Ces deux configurations restantes correspondent strictement à l'interaction en environnement réel. Ces remarques demandent à être approfondies et validées par l'expérimentation. Cependant, elles montrent que ce modèle peut s'adapter à différentes technologies et être d'une aide précieuse pour les analyser.

7.1.2 *Gestion des référentiels spatiaux*

Le modèle de l'interaction proposé peut être critiqué car il ne prend pas en compte les systèmes de référence de l'utilisateur, c'est-à-dire comment il interprète les déplacements soit par rapport à lui-même (égocentrique) soit par rapport aux objets présents dans l'environnement (exocentrique). La situation semblant être la plus problématique est l'interprétation des déplacements du point de vue (la tâche de locomotion) pour les personnes ayant un système de référence exocentrique. En effet, ces utilisateurs peuvent avoir tendance à interpréter les transformations sur le point de vue comme étant des transformations sur la scène tridimensionnelle.

Pour pallier à ce problème d'interprétation des déplacements, deux solutions peuvent être retenues. La première consiste à proposer, dans la même interface, le contrôle du point de vue et la manipulation la scène comme dans *Cosmo Player*. Notre étude de cette interface a montré que certains utilisateurs préféraient contrôler le point de vue tandis que d'autres préféraient manipuler la scène. Par contre, les performances (en temps de complétion et en nombre de fonctionnalités sélectionnées) restaient similaires. Ce premier résultat indique que la proposition simultanée de deux modes d'interaction permet à l'utilisateur de choisir un mode d'interaction adaptée à ses stratégies cognitives. Cependant, les opérations de changement de référentiel ne semblent pas facilement compréhensibles pour les utilisateurs, surtout lorsque aucune transformation n'est contrainte ou aidée. Ainsi, lors des changements de référentiel, le point de vue peut se trouver à l'intérieur de la scène tridimensionnelle alors que l'utilisateur manipule cette scène. Cette configuration d'interaction a été identifiée comme problématique. Cette piste n'a pas été explorée, plus avant, car elle est fortement dépendante de l'implémentation et des contraintes fixées lors du changement de référentiel. Nous nous sommes donc consacrés à l'étude de la manipulation du point de vue et de la scène de manière indépendante. Cette étude des changements de référentiel fait partie de nos perspectives de recherche. Dans cette perspective, la première étape passerait par la proposition et l'implémentation de différentes techniques permettant à l'utilisateur de passer du contrôle du point de vue, au contrôle

de la scène et inversement. Il est, par exemple, possible de contraindre certaines orientations de la scène, de positionner systématiquement le point de vue à l'extérieur de la scène, d'aligner ou non les repères du point de vue et de la scène, *etc.* C'est seulement après avoir identifié la technique de changement de référentiel, la moins problématique, que les stratégies d'utilisation de ces deux référentiels ainsi que les caractéristiques des utilisateurs en fonction de leur préférence entre ces référentiels pourraient être étudiées.

La seconde solution pour pallier à ces problèmes d'interprétation des déplacements consiste à soutenir l'utilisation d'un système de référence. Les sujets exocentriques ont des difficultés à interpréter les déplacements sur le point de vue lors de la tâche de locomotion. La mise en place d'une stratégie égocentrique pour ces utilisateurs doit être soutenue. Des résultats expérimentaux ont suggéré qu'un grand écran pouvait soutenir la mise en place de cette stratégie (Tan *et al.*, 2003 ; 2004 ; Tan, 2004). Nos résultats ont montré un gain de performance sur grand écran pour les tâches de locomotion, mais également pour celles de manipulation qui ne devraient pas requérir l'utilisation d'une stratégie égocentrique. Nos résultats montrent également qu'un grand écran profite de manière identique aux sujets dépendants et indépendants à l'égard du champ. Les sujets dépendants devraient profiter des grands écrans puisqu'ils se basent sur des stratégies exocentriques. Ces résultats ne nous permettent donc pas de conclure sur une solution pour soutenir la mise en place d'une stratégie égocentrique sur un grand écran. Par contre, ils remettent en cause l'hypothèse concernant le fait qu'un grand écran soutient la mise en place d'une telle stratégie. Dans ce cadre, notre principale perspective est la recherche d'aides permettant la mise en place de la stratégie adéquate. Par exemple, l'ajout d'une représentation virtuelle de l'utilisateur (un avatar) pourrait aider l'utilisateur à comprendre qu'il est en train de contrôler cet avatar et par conséquent son point de vue. Une autre piste de réflexion pourrait être d'étudier la locomotion dans un environnement virtuel ayant une structure et une sémantique. Par exemple, nous pouvons supposer que le déplacement locomoteur est plus facilement identifiable dans une ville virtuelle que dans un environnement virtuel abstrait.

7.2 *L'utilisateur*

Concernant l'étude de l'utilisateur, nos résultats s'organisent également selon deux axes, le premier concernant l'impact des capacités spatiales sur la performance, notamment en fonction de la taille de l'écran, le second traitant de l'impact des facteurs généraux (expérience en jeu vidéo, dépendance-indépendance à l'égard du champ et sexe) sur la performance.

7.2.1 Capacités spatiales et taille de l'écran

L'étude des caractéristiques influençant les performances d'interaction en réalité virtuelle a montré que les capacités spatiales, que ce soit lors des tâches de manipulation ou de locomotion, devant un petit écran ou un mur immersif, sont fortement impliquées dans cette performance. En réalité virtuelle, cette implication des capacités spatiales a souvent été montrée dans le cadre d'études sur la recherche d'itinéraire. Nos résultats permettent de généraliser ces conclusions et de montrer que les capacités spatiales sont impliquées dans les trois principales tâches de la réalité virtuelle : locomotion, recherche d'itinéraire et manipulation. Nous avons utilisé deux interfaces différentes : la première *IRI* est basée sur l'utilisation d'une souris et de boutons interactifs ; la seconde, le *CAT*, se base sur des métaphores réelles (manipulation d'un objet ou conduite d'une voiture). Quelle que soit l'interface utilisée, les capacités spatiales sont impliquées dans la performance. Ce résultat montre la robustesse de cette implication. Il demande néanmoins à être confirmé dans d'autres configurations d'interaction et pour des tâches plus complexes.

Un résultat notable module cependant ces résultats. En effet, lors de l'utilisation d'*IRI* devant un grand écran, un gain de performances a été montré ainsi qu'une absence de corrélation significative des capacités spatiales avec cette performance. Un grand écran semble permettre de diminuer l'implication des capacités spatiales dans la tâche et de soutenir un haut niveau de performance pour les utilisateurs ayant des difficultés spatiales. Des études complémentaires doivent être menées afin de mieux comprendre l'impact d'un grand écran sur la performance d'interaction. Un point semble particulièrement intéressant à étudier dans cette optique : la perception de la distance à l'écran. En effet, pour maintenir l'angle de vue de l'utilisateur constant entre un petit écran et un grand écran, le grand écran a été éloigné à plus de 5 mètres de l'utilisateur. La luminosité de la salle où les expérimentations ont été passées était constante, mais pas nulle. L'utilisateur percevait donc la distance entre sa position et l'écran, cette perception de la distance pourrait influencer l'appréhension du grand écran par l'utilisateur et soutenir la mise en place d'une stratégie différente par rapport au petit écran. Il pourrait être pertinent de renouveler notre étude en maintenant l'obscurité totale de la salle afin de minimiser cette perception des distances.

7.2.2 Facteurs généraux

Notre étude des caractéristiques des utilisateurs a également montré que l'expérience en jeux vidéo et la dépendance-indépendance à l'égard du champ sont impliquées dans la performance d'interaction quelle que soit l'interface, la tâche étudiée et la taille de l'écran. Les utilisateurs non expérimentés en jeux vidéo et dépendants à l'égard du champ sont les utilisateurs les plus en difficulté lors de l'interaction en réalité virtuelle dans le cadre des tâches

et des interfaces que nous avons étudiées. Ces résultats peuvent être affinés en précisant que ces utilisateurs sont essentiellement des femmes, mais également des utilisateurs ayant des difficultés en capacités spatiales. Nos résultats permettent donc d'identifier un profil de l'utilisateur étant potentiellement en difficulté lors de l'interaction en réalité virtuelle : les femmes ne jouant pas aux jeux vidéo, dépendantes à l'égard du champ et ayant des faibles capacités spatiales. Il conviendra donc de soutenir l'interaction grâce à des aides pour ces utilisateurs. Une synthèse de ces résultats est présentée dans le tableau 7.1. Comme précédemment, ces résultats demandent à être généralisés à d'autres types d'interfaces et de tâches. Des études doivent également être développées pour identifier et valider des aides dédiées à ces utilisateurs en difficulté.

Utilisateurs performants	Utilisateurs peu performants
Indépendants à l'égard du champ	Dépendants à l'égard du champ
Expérimentés dans la tâche (Joueurs en jeux vidéo)	Novices dans la tâches (Non joueurs en jeux vidéo)
Bons en Capacités Spatiales	Faibles en Capacités Spatiales
Hommes	Femmes

Tableau 7.1 – *Profil des utilisateurs performants et peu performants dans nos expérimentations*

Pour conclure, nous pouvons soulever une perspective à plus long terme de nos travaux : l'utilisation de la réalité virtuelle en psychologie expérimentale ou en neuropsychologie. Dans ce cadre, la réalité virtuelle peut permettre d'évaluer les pathologies des patients, de les rééduquer, mais également de mesurer et d'étudier les fonctions cognitives. Les technologies de la réalité virtuelle permettent de créer des environnements de test des performances humaines plus sophistiqués et plus précis qui peuvent compléter les procédures d'études traditionnelles en minimisant la variabilité due aux différences entre les examinateurs, l'environnement de test et la qualité des stimuli. De plus, elle peut permettre d'effectuer des mesures plus précises et plus spécifiques des comportements, en améliorant la validité écologique de ce qui est mesuré (Pugnetti *et al.*, 1995). Pour évaluer différentes composantes cognitives comme la planification ou la mémoire, des études ont déjà pu montrer les avantages des technologies de la réalité virtuelle (Attree *et al.*, 1996 ; Pugnetti *et al.*, 1998a ;b). Cependant dans le cadre de l'évaluation cognitive, il est primordial de savoir exactement ce qui est mesuré. Le principal problème de l'utilisation de la réalité virtuelle est celui du choix de l'interface et de son impact sur la performance (Schultheis *et al.*, 2002). Ainsi un sujet en échec dans une tâche mnésique réalisée en réalité virtuelle, est-il en difficulté à cause du coût spatial de l'interaction ou à cause de problèmes mnésiques ? Cette recherche peut servir de fondement à ces travaux, il apparaît ainsi que quelle que soit l'interface et la tâche (même des tâches simples), il est primordial d'étudier les résultats obtenus en contrôlant l'impact des capacités spatiales, de l'expérience en jeux vidéo, de la dépendance-indépendance à l'égard du champ et du sexe sur la performance.

Les résultats de nos travaux concernant la tâche et l'utilisateur ont permis d'identifier un certain nombre de problèmes soulevés par l'utilisation d'un système de réalité virtuelle. En adoptant une démarche centrée sur l'utilisateur, nous avons tenté d'apporter un certain nombre de solutions à ces problèmes. Cependant, les nombreuses difficultés résultant de l'interaction, les différences inter-individuelles de performances nous amènent à nous poser la question de la pertinence d'utiliser la réalité virtuelle. En effet, avant de concevoir une application de réalité virtuelle, il est crucial de se demander si les informations supplémentaires, que peut fournir une application de réalité virtuelle par rapport à une application de visualisation classique, sont suffisamment importantes en terme de performances pour pallier aux conséquences de l'utilisation d'un tel système. L'utilisation de la réalité virtuelle n'est pertinente que si l'utilisateur peut effectivement en tirer partie ce qui, à notre avis, est loin d'être systématiquement le cas.

Bibliographie

- 1 – ADAMS, N. & LANG, L. (1995). VR improves motorola training program. *AI Expert*, 10(5):13–14.
- 2 – ALARIO, F. X. & FERRAND, L. (1999). A set of 400 pictures standardized for french: norms for name agreement, image agreement, familiarity, visual complexity, image variability, and age of acquisition. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 31(3):531–552.
- 3 – ALBARET, J. M. & AUBERT, E. (1996). Étalonnage 15-19 ans du test de rotation mentale de Vandenberg. *Evolutions Psychomotrices*, 8(34):206–215.
- 4 – ALLPORT, D., ANTONIS, B. & REYNOLDS, P. (1972). On the division of attention: a disproof of the single channel hypothesis. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 24(2): 225–235.
- 5 – ALLPORT, G. W. (1937). *Personality: a psychological interpretation*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- 6 – ARNALDI, B., CHAUFFAUT, A., DUVAL, T. & DONIKIAN, S. (2003). OPENMASK : Une plate forme logicielle open source pour la réalité virtuelle, Dans *Le Traité de la Réalité Virtuelle*, volume 2, chapitre 5, pages 125–154. Presse de l'Ecole des Mines.
- 7 – ARTHUR, W., STRONG, M. H., JORDAN, J. A., WILLIAMSON, J. E., SHEBILSKÉ, W. L. & REGIAN, J. W. (1995). Visual attention: Individual differences in training and predicting complex task performance. *Acta Psychologica*, 88(1):3–23.
- 8 – ASCH, S. E. & WITKIN, H. A. (1948a). Studies in space orientation (I): perception of the upright with displaced visual field. *Journal of Experimental Psychology*, 38:325–337.

- 9 – ASCH, S. E. & WITKIN, H. A. (1948b). Studies in space orientation (II): perception of the upright with displaced visual field and with body tilted. *Journal of Experimental Psychology*, 38:455–477.
- 10 – ASTUR, R. S., TROPP, J., SAVA, S., CONSTABLE, R. T. & MARKUS, E. J. (2004). Sex differences and correlations in a virtual morris water task, a virtual radial arm maze, and mental rotation. *Behavioural Brain Research*, 151(1-2):103–115.
- 11 – ATKINSON, R. C. & SHIFFRIN, R. M. (1968). *The Psychology of Learning and Motivation*, volume 2. New York Academic Press.
- 12 – ATTREE, E., BROOKS, B., ROSE, F., ANDREWS, T., LEADBETTER, A. & CLIFFORD, B. (1996). Memory processes and virtual environments: I can't remember what was there but I can remember how I got there. Implications for people with disabilities. Dans les actes de la conférence *the First European Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies*.
- 13 – BACH, C. (2004). *Elaboration et Validation de Critères Ergonomiques pour les Interactions Homme-Environnements Virtuels*. Thèse de doctorat, Université de Metz, Ecole doctorale PIEMES.
- 14 – BACH, C. & SCAPIN, D. L. (2003). Adaptation des critères ergonomiques aux interactions homme environnement virtuel. Dans les actes de la conférence *IHM'03*, pages 24–31.
- 15 – BADDELEY, A. D. (1966). Short-term memory for word sequences as a function of acoustic, semantic and formal similarity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 18(4): 362–365.
- 16 – BADDELEY, A. D. (1986). *Working Memory*. Clarendon Press.
- 17 – BADDELEY, A. D. (1992). Is working memory working? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 44A(1):1–31.
- 18 – BADDELEY, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory. *Trends in Cognitive Science*, 4(11):417–423.
- 19 – BAKKER, N. H. (2001). *Spatial Orientation in Virtual Environments*. DUP Science Netherlands.
- 20 – BALAKRISHNAN, R. (2004). Beating Fitts' law: virtual enhancements for pointing facilitation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61(6):857–874.
- 21 – BARFIELD, W. & WEGHORST, S. (1993). The sense of presence within virtual environments: a conceptual model. Dans les actes de la conférence *HCI International'93*. Elsevier Amsterdam-London-New York-Tokyo.
- 22 – BARNARD, P. J. (1985). Cognitive resources and the learning of computer dialogs, Dans *Interfacing Though Cognitive Aspects of Human Computer Interaction*, pages 112–158. MIT Press.

- 23 – BARTHET, M. F. & TARBY, J. C. (1996). The DIANE+ method. Dans les actes de la conférence *CADUI'96 Computer-Aided Design of User Interfaces*, pages 95–119. Namur, Belgium: Presses Universitaires de Namur.
- 24 – BASTIEN, J. M. & SCAPIN, D. L. (2001). Evaluation des systèmes d'information et critères ergonomiques, Dans *Systèmes d'Information et Interactions Homme-Machine. Environnements Évolués et Evaluations de l'IHM pour les SI*, volume 2, chapitre 2, pages 53–79. Paris : Hermes.
- 25 – BENNETT, G. K., SEASHORE, H. G. & WESMAN, A. G. (1974). *Manual for the Differential Aptitude Test*. New York: The Psychological Corp, Cinquième édition.
- 26 – BENYON, D. R. (1993). Accommodating individual differences through an adaptive user interface, Dans *Adaptive User Interfaces - Results and Prospects*, pages 149–165. Elsevier Science Publications, North-Holland, Amsterdam,.
- 27 – BENYON, D. R. & MURRAY, D. M. (1993). Applying user modelling to human-computer interaction design. *AI Review*, 6:43–69.
- 28 – BLUMENTHAL, A. L. (1977). *The Process of Cognition*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall.
- 29 – BOTELLA, C., OSMA, J., GARCIA-PALACIOS, A., QUERO, S. & BANOS, R. M. (2004). Treatment of flying phobia using virtual reality: data from a 1-year follow-up using a multiple baseline design. *Clinical Psychology and Psychotherapy*, 11(5):311–323.
- 30 – BOUGUILA, L., ISHII, M. & SATO, M. (2000). A large workspace haptic device for human-scale virtual environments. Dans les actes de la conférence *Haptic Human-Computer Interaction*.
- 31 – BOWMAN, D. A. (1999). *Interaction Techniques for Common Tasks in Immersive Virtual Environments : Design, Evaluation and Application*. Thèse de doctorat, Georgia Institute of Technology.
- 32 – BOWMAN, D. A., DAVIS, E. T., HODGES, L. F. & BADRE, A. N. (1999). Maintaining spatial orientation during travel in an immersive virtual environment. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(6):618–631.
- 33 – BOWMAN, D. A., GABBARD, J. & HIX, D. (2001). Usability evaluation in virtual environments: classification and comparison of methods. Rapport technique TR-01-07, Computer Science Virginia Polytechnic Institute and State University.
- 34 – BOWMAN, D. A. & HODGES, L. F. (1997). An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments. Dans les actes de la conférence *Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 35–38.
- 35 – BOWMAN, D. A., KOLLER, D. & HODGES, L. (1998). A methodology for evaluation of travel techniques for immersive virtual environments. Dans les actes de la conférence *Virtual reality : Research, Development, and Applications*, pages 120–131.

- 36 – BOWMAN, D. A., KRUIJFF, E., LAVIOLA, J. J., MINE, M. M. & POUPYREV, I. (2000). 3D user interface design: fundamental techniques theory and practice. Dans *CD-Rom Courses Notes. SIGGRAPH 2000*. ACM.
- 37 – BOY, G. (2003). *Ingénierie Cognitive*. Hermes Lavoisier.
- 38 – BOYD, C. (1995). Human and machine dimensions of 3D interfaces for virtual environments. Dans les actes de la conférence *Human Factors in Computing Systems*, pages 41–42.
- 39 – BROUWER, D. (2005). The influence of field dependence on presence in virtual reality. Dans les actes de la conférence *The second Student Conference on Innovation and Technology*.
- 40 – BROWN, J. S. & SLATER-HAMMEL, A. T. (1949). Discrete movements in the horizontal plane as a function of their length and direction. *Journal of Experimental Psychology*, 39:84–95.
- 41 – BROWN, L. N., LAHAR, C. J. & MOSLEY, J. L. (1998). Age and gender related differences in strategy use for route information. A map present direction giving paradigm. *Environment & Behavior*, 30(2):123–143.
- 42 – BURDEA, G. & COIFFET, P. (1993). *La Réalité Virtuelle*. Hermès.
- 43 – BUXTON, W. (1990). A three-state model of graphical input. Dans les actes de la conférence *Human Computer Interaction INTERACT*, pages 449–456. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- 44 – BYRNE, C. (1996). *Water on Tap: the Use of Virtual Reality as an Educational Tool*. Thèse de doctorat, Department of Industrial Engineering, University of Washington, Seattle.
- 45 – BYRNE, M. D. (2001). ACT-R/PM and menu selection: applying a cognitive architecture to HCI. *International Journal of Human Computer Studies*, 55(1):41–84.
- 46 – BYRNE, M. D. & ANDERSON, J. R. (1998). Perception and action, Dans *The Atomic Components of Thought*, chapitre 6, pages 167–200. Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- 47 – BYSTROM, K. E., BARFIELD, W. & HENDRIX, C. (1999). A conceptual model of the sense of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and virtual Environments*, 8(2):241–244.
- 48 – CAIL, F. & MÉREAU, P. (1998). *Les Écrans de Visualisation: Guide Méthodologique pour le Médecin du Travail*. INRS.
- 49 – CAMUS, J. F. (1996). *La Psychologie Cognitive de l'Attention*. Armand Colin.
- 50 – CARD, S., MORAN, T. & NEWELL, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Lawrence Erlbaum.
- 51 – CARD, S. K., ENGLISH, W. K. & BURR, B. J. (1978). Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys, and text keys for text selection on a CRT. *Ergonomics*, 21(8): 601–613.
- 52 – CAROLL, J. B. (1993). *Human Cognitive Abilities: A Survey of Factor-Analytic Studies*. Cambridge University Press.

- 53 – CARPENTER, P. A. & JUST, M. A. (1986). Spatial ability: an information processing approach to psychometrics, Dans *Advances in the Psychology on Human Intelligence*, chapitre 3, pages 221–253. Hillsdale, N. J. : Erlbaum.
- 54 – CARROLL, J. M. (2003). *HCI, Models, Theories, and Frameworks: Toward a Multidisciplinary Science*. Morgan Kaufmann.
- 55 – CHAPANIS, A., GARNER, W. R. & MORGAN, C. T. (1949). *Applied Experimental Psychology: Human Factors in Engineering Design*. John Wiley and Sons.
- 56 – CHARITOS, D. (1997). Designing space in virtual environments for aiding wayfinding behavior. Dans les actes de la conférence *the fourth UK VR-SIG Conference*.
- 57 – CHASE, W. G. & SIMON, H. A. (1973). The mind's eye in chess, Dans *Visual Information Processing*, pages 215–281. New York: Academic.
- 58 – CHEN, C. (2000). Individual differences in a spatial semantic virtual environment. *Journal of the American Society for Information Science*, 51(6):529–542.
- 59 – CHEN, C., CZERWINSKI, M. & MACREDIE, R. (2000). Individual differences in virtual environments - Introduction and overview. *Journal of the American Society for Information Science*, 51(6):499–507.
- 60 – CHEN, C. & RADA, R. (1996). Interacting with hypertext: a meta-analysis of experimental studies. *Human-Computer Interaction*, 11(2):125–156.
- 61 – CHEN, C. & YU, Y. (2000). Empirical studies of information visualization: a meta-analysis. *International Journal of Human Computer Studies*, 53(5):851–866.
- 62 – CHEN, J. L. & STANNEY, K. M. (1999). A theoretical model of wayfinding in virtual environments: proposed strategies for navigational aiding. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(6):671–685.
- 63 – CHEN, S. Y. & FORD, N. (1998). Modelling user navigation behaviours in a hypermedia based learning system: an individual differences approach. *Knowledge Organization*, 25(3):67–68.
- 64 – CHEN, S. Y. & MACREDIE, R. D. (2002). Cognitive styles and hypermedia navigation: development of a learning model. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 53(1):3–15.
- 65 – CLARK, S., SEAT, E. & WEBER, F. (2000). The performance of engineering students on the group embedded figures test. Dans les actes de la conférence *30th ASEE/IEEE Frontiers in Education*, volume 1, pages T3A/1–T3A/4.
- 66 – COLTHEART, M. (1980). Iconic memory and visible persistence. *Perception and Psychophysics*, 27(3):183–228.
- 67 – COLUCCIA, E. & LOUSE, G. (2004). Gender differences in spatial orientation: a review. *Journal of Environmental Psychology*, 24(3):329–340.

- 68 – CONRAD, R. (1967). Interference or decay over short retention intervals. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 6:49–54.
- 69 – COUILLET, J., LECLERCQ, M., MORONI, C. & AZOUVI, P. (2002). *La Neuropsychologie de l'Attention*. Solal, Société de Neuropsychologie de Langue Française.
- 70 – COUTAZ, J. (1991). *Interfaces Homme-Machine: un Regard Critique*. AFCET-Bordas.
- 71 – COUTAZ, J., NIGAY, L. & SALBER, D. (1993). The MSM framework: a design space for multi-sensori-motor systems. Dans les actes de la conférence *the Human-Computer Interaction, Third International Conference, EWHCI'93*, pages 231–241.
- 72 – COWAN, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychological Bulletin*, 104(2):163–191.
- 73 – COWEY, A., SMALL, M. & ELLIS, S. (1994). Left visuo-spatial neglect can be worse in far than in near space. *Neuropsychologia*, 32(9):1059–1066.
- 74 – COWEY, A., SMALL, M. & ELLIS, S. (1999). No abrupt change in visual hemineglect from near to far space. *Neuropsychologia*, 37(1):1–6.
- 75 – CROSSMAN, E. R. F. & GOODEVE, P. J. (1983). Feedback control of hand-movement and Fitts' law. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35(2):251–278.
- 76 – CRUZ-NEIRA, C., SANDIN, D. J., DEFANTI, T. A., KENYON, R. & HART, J. C. (1992). The CAVE, audio visual experience automatic virtual environment. Dans *Communications of the ACM*, pages 64–72.
- 77 – CUTMORE, T., HINE, T., MABERLY, K., LANGFORD, N. & HAWGOOD, G. (2000). Cognitive and gender factors influencing navigation in a virtual environment. *International Journal of Human Computer Studies*, 53(2):223–249.
- 78 – DAHLBÄCK, N., HÖÖK, K. & SJÖLINDER, M. (1996). Spatial cognition in the mind and in the world: the case of hypermedia navigation. Dans les actes de la conférence *the 18th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*.
- 79 – DARKEN, R. P. & SIBERT, J. L. (1993). A toolset for navigation in virtual environments. Dans les actes de la conférence *UIST'93 User Interface Software and Technology*, pages 157–165. ACM.
- 80 – DARKEN, R. P. & SIBERT, J. L. (1996). Navigating in large virtual spaces. *International Journal of Human Computer Interaction*, 8(1):49–71.
- 81 – DARWIN, C. J., TURVEY, M. T. & CROWDER, R. G. (1972). An auditory analogue of the Sperling partial report procedure: evidence for brief auditory storage. *Cognitive Psychology*, 3(2):255–267.
- 82 – DENIS, M. (1990). Approches différentielles de l'imagerie mentale, Dans *Cognition : l'Individuel et l'Universel*, chapitre 3, pages 91–120. PUF : Psychologie d'aujourd'hui.

- 83 – DI LOLLO, V. & DIXON, P. (1988). Two forms of persistence in visual information processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14(4):671–681.
- 84 – DIAPER, D. & STANTON, N. (2004). *The Handbook of Task Analysis for Human-Computer Interaction*. Lawrence Erlbaum Associates.
- 85 – DIAZ, D. D. & SIMS, V. K. (2003). Augmenting virtual environments: the influence of spatial ability on learning from integrated displays. *High Ability Studies*, 14(2):190–212.
- 86 – DICKSTEIN, L. S. (1968). Field-dependence and concept attainment. *Perceptual and Motor Skills*, 27:635–542.
- 87 – DISSA, A. (1986). Models of computation, Dans *User-Centered System Design: New Perspectives in Human-Computer Interaction*, pages 201–218. Hillsdale, NJ: LEA.
- 88 – DIX, A., FINLAY, J., ABWOD, G. & BEALE, R. (1998). *Human Computer Interaction*. Cambridge UK: Prentice Hall, Seconde édition.
- 89 – DOWNS, R. M. & STEA, D. (1977). *Maps in Minds: Reflections on Cognitive Mapping*. New York: Harper and Row.
- 90 – DUBOIS, T. E. & COHEN, W. (1970). Relationship between measures of psychological differentiation and intellectual ability. *Perceptual and Motor Skills*, 31(2):411–416.
- 91 – EGAN, D. E. (1988). Individual differences in human computer interaction, Dans *Handbook of Human Computer Interaction*, pages 543–568. Elsevier Science Publishers.
- 92 – EGAN, D. E. & GOMEZ, L. M. (1985). Assaying, isolating, and accommodating individual differences in learning a complex skill, Dans *Individual Differences in Cognition*, volume 2, pages 173–217. New York: Academic Press.
- 93 – EKSTROM, R. B., FRENCH, J. W. & HARMAN, H. H. (1976). *Manual for Kit of Factor Referenced Cognitive Tests*. Educational Testing Service.
- 94 – EPPS, B. W. (1986). Comparison of six cursor control devices based on Fitts law models. Dans les actes de la conférence *the Human Factor Society 30th Annual Meeting*, pages 327–331.
- 95 – ERICSSON, K. A. & KINTSCH, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, 102(2):211–245.
- 96 – ERICSSON, K. A. (1999). Creative expertise as superior reproducible performance: innovative and flexible aspects of expert performance. *Psychological Inquiry*, 10(4):329–361.
- 97 – ERICSSON, K. A., KRAMPE, R. T. & TESCH-ROEMER, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, 100(3):363–406.
- 98 – ERICSSON, K. A. & LEHMANN, A. C. (1996). Expert and exceptional performance: evidence of maximal adaptation to task constraints. *Annual Review of Psychology*, 47:273–305.
- 99 – ERICSSON, K. A. & SMITH, J. (1991). *Towards a General Theory of Expertise*. Cambridge University Press.
- 100 – EVANS, G. W. (1980). Environmental cognition. *Psychological Bulletin*, 88(2):259–287.

- 101 – FARNÈ, A., ZELONI, G. & LÀDAVAS, E. (1999). Visual peripersonal space centered on the face in humans. *Cortex*, 35(130).
- 102 – FERNANDO, T., MURRAY, N., TAN, K. T. W. & WIMALARATNE, P. (1999). Software architecture for a constraint-based virtual environment. Dans les actes de la conférence *VRST'99 Virtual Reality Software and Technology*, pages 147–154. ACM.
- 103 – FINKE, R. (1989). *Principles of Mental Imagery*. Cambridge, MA: MIT Press.
- 104 – FITTS, P. M. (1954). The information capacity of human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6):381–391.
- 105 – FITTS, P. M. & PETERSON, J. R. (1964). Information capacity of discrete motor response. *Journal of Experimental Psychology*, 67(2):103–112.
- 106 – FITTS, P. M. & POSNER, M. I. (1967). *Human Performance*. Belmont California: Brooks Cole.
- 107 – FOLEY, D., WALLACE, V. & CHAN, V. (1984). The human factors of computer graphics interaction techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 4(11):13–48.
- 108 – FOLEY, J., VAN DAM, A., FEINER, S. & HUGHES, J. (1992). *Computers Graphics, Principles and Practice*. Addison-Wesley, Seconde édition.
- 109 – FOREMAN, N., SANDAMAS, G. & NEWSON, D. (2004). Distance underestimation in virtual space is sensitive to gender but not activity-passivity or mode of interaction. *Cyberpsychology & Behavior*, 7(4):451–457.
- 110 – FOX, J. G. & STANSFIELD, R. G. (1964). Diagram keying times for typists. *Ergonomics*, 7:317–320.
- 111 – FRIES, F. (2003). Proposition pour développer l'industrie du jeu vidéo en France. Rapport technique, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.
- 112 – FRÉTÉ, C. (2002). Le potentiel du jeu vidéo pour l'éducation. Mémoire de DESS STAF Université de Genève.
- 113 – FUCHS, P., ARNALDI, B. & TISSEAU, J. (2003). La réalité virtuelle et ses applications, Dans *Le Traité de la Réalité Virtuelle*, volume 1, chapitre 1, pages 3–48. Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- 114 – FUCHS, P. & BURKHARDT, J. M. (2003). Approche théorique et pragmatique de la réalité virtuelle, Dans *Le Traité de la Réalité Virtuelle*, volume 1, chapitre 2, pages 53–101. Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- 115 – FUCHS, P. & MOREAU, G. (2003). *Le Traité de la Réalité Virtuelle*. Presse de l'Ecole des Mines, Seconde édition.
- 116 – FUCHS, P., NASHASHIBI, F. & LOURDEAUX, D. (1999). A theoretical approach of the design and evaluation of a virtual reality device. Dans les actes de la conférence *Virtual Reality and Prototyping*.

- 117 – GABBARD, J. L. & HIX, D. (1997). A taxonomy of usability characteristics in virtual environments. Rapport technique, Office of Naval Research, Department of Computer Science, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- 118 – GAGGIOLI, A. (2003). Using virtual reality in experimental psychology, Dans *Towards Cyber-Psychology: Mind, Cognitions and Society in the Internet Age*, chapitre 9, pages 157–173. IOS Press.
- 119 – GALEA, L. & KIMURA, D. (1993). Sex differences in route-learning. *Personality and Individual Differences*, 14(1):53–65.
- 120 – GAMBOA RODRIGUEZ, F. (1998). *Spécification et Implémentation d'ALACUE: Atelier Logiciel d'Aide à la Conception d'Interfaces Ergonomiques*. Thèse de doctorat, Université Paris XI.
- 121 – GANIS, G., THOMPSON, W. L. & KOSSLYN, S. M. (2004). Brain areas underlying visual mental imagery and visual perception: an fMRI study. *Cognitive Brain Research*, 20:226–241.
- 122 – GARDNER, R. W., JACKSON, D. N. & MESSICK, S. J. (1960). Personality organization in cognitive controls and intellectual abilities. *Psychological Issues Monograph* 8, 2(4).
- 123 – GILLAN, D. J., HOLDEN, K., ADAM, S., RUDISILL, M. & MAGEE, L. (1990). How does fitt's law fit pointing and dragging? Dans les actes de la conférence *CHI'90 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 227–234. ACM.
- 124 – GOERGER, S., DARKEN, R., BOYD, M., GAGNON, T., LILES, S., SULLIVAN, J. & LAWSON, J. (1998). Spatial knowledge acquisition from maps and virtual environments in complex architectural spaces. Dans les actes de la conférence *the 16th Applied Behavioral Sciences Symposium*, pages 6–10.
- 125 – GRÜSSER, O. J. (1983). Multimodal structure of the extrapersonal space, Dans *Spatially Oriented Behavior*, pages 327–352. New York : Springer Verlag.
- 126 – GUILFORD, J. P. (1967). *The Nature of Human Intelligence*. Mc Graw-Hill.
- 127 – GUILFORD, J. P. & LACEY, J. I. (1947). Printed classification tests. Rapport technique 5, AAF Aviation Psychology Research Program Reports.
- 128 – GUILFORD, J. P. & ZIMMERMAN, W. S. (1989). *Manuel Test d'Orientation Spatiale*. Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée. Edition originale Sheridan Supply Co - Publié par Consulting Psychologist Press 1947.
- 129 – HACHET, M. (2003). *Interaction avec des Environnements Virtuels Affichés au Moyen d'Interface de Visualisation Collective*. Thèse de doctorat, LaBRI - Université Bordeaux 1.
- 130 – HACHET, M. & GUITTON, P. (2002). The interaction table - a new input device designed for interaction in immersive large display environments. Dans MULLER, S. & STURZLINGER, W., éditeurs : les actes de la conférence *the Eight Eurographics Workshop on Virtual Environments*.

- 131 – HACHET, M., GUITTON, P., REUTER, P. & TYNDIUK, F. (2003). The CAT for efficient 2D and 3D interaction as an alternative to the mouse and its adaptations. Dans les actes de la conférence *VRST 2003 Virtual Reality Software and Technology*, pages 205–212.
- 132 – HALL, E. T. (1966). *The Hidden Dimension*. New York : Doubleday.
- 133 – HALLIGAN, P. W. & MARSHALL, J. C. (1991). Left neglect for near but not for far space in man. *Nature*, 350(6318):498–500.
- 134 – HAMMOUCHE, H. (1995). *De la Modélisation des Tâches Utilisateurs à la Spécification Conceptuelle et Sémantique d’Interfaces Homme-Machine*. Thèse de doctorat, Université de Paris VI.
- 135 – HATWELL, Y. (1990). Le développement des concepts spatiaux : de la théorie de Piaget aux théories du traitement de l’information, Dans *Développement et Fonctionnement Cognitifs*, pages 53–69. Paris : Presses Universitaires de France.
- 136 – HEBB, D. O. (1949). *The Organization of Behavior*. Wiley.
- 137 – HECKER, R. & MAPPERSON, B. (1997). Dissociation of visual and spatial processing in working memory. *Neuropsychologia*, 35(5):599–603.
- 138 – HEGARTY, M., SHAH, P. & MIYAKE, A. (2000). Constraints on using the dual-task methodology to specify the degree of central executive involvement in cognitive tasks. *Memory and Cognition*, 28(3):376–385.
- 139 – HEGARTY, M. & WALLER, D. (2004). A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities. *Intelligence*, 32(2):175–191.
- 140 – HICK, W. E. (1952). On the rate of gain of information. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4:11–26.
- 141 – HORNOF, A. J. & KIERAS, D. E. (1997). Cognitive modelling reveals menu search is both random and systematic. Dans les actes de la conférence *CHI’97 Conference Human Interaction*, pages 107–114. ACM.
- 142 – HOUDE, O., KAYSER, D., KOENIG, O., PROUST, J. & RASTIER, F. (1998). *Vocabulaire de Sciences Cognitives*. Presses Universitaires de France.
- 143 – HUTEAU, M. (1987). *Style Cognitif et Personnalité : la Dépendance-Indépendance à l’Egard du Champ*. Presses Universitaires de Lille.
- 144 – IRWIN, D. E. & YEOMANS, J. M. (1986). Sensory registration and informational persistence. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12(3):343–360.
- 145 – ISO-9241-11 (1998). *Ergonomic requirements for office work with visual display terminal (VDTs) Part 11 : Guidance on Usability*. Organisation Internationale des Standards.
- 146 – JAGACINSKI, R. J., REPPERGER, D. W., WARD, S. L. & MORAN, M. S. (1980). A test of Fitts’ law with moving target. *Human Factors*, 22(2):225–233.

- 147 – JAMBON, F. (1996). *Erreurs et interruptions du point de vue de l'ingénierie de l'interaction homme-machine*. Informatique, Université de Grenoble.
- 148 – JOHN, B. E. (1990). Extensions of GOMS analyses to expert performance requiring perception of dynamic visual and auditory information. Dans les actes de la conférence *CHI Conference Human Interaction*, pages 107–115. ACM.
- 149 – JOHN, B. E. & KIERAS, D. E. (1996). Using GOMS for user interface design and evaluation : which technique. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 3(4):287–319.
- 150 – JOHNSON, H. & JOHNSON, P. (1991). Task knowledge structures: psychological basis and integration into system design. *Acta Psychologica*, 78(1-3):3–26.
- 151 – JOHNSON-LAIRD, P. N. (1983). *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness*. Cambridge, MA: Harvard University Press. Cambridge University Press.
- 152 – JONASSEN, D. H. & GRABOWSKI, B. (1993). *Individual Differences and Instruction*. New York: Allen and Bacon.
- 153 – JUHEL, J. (1990). Différences individuelles dans le traitement de l'information spatiale. *Revue de Psychologie Appliquée*, 40(3):331–356.
- 154 – JUL, S. & FURNAS, G. W. (1997). Navigation in electronic worlds: a CHI'97 workshop report. *SIGCHI Bulletin*, 29(4):44–49.
- 155 – KAGAN, J., ROSMAN, B., DAY, D., ALBERT, J. & PHILIPS, W. (1964). Information processing and the child: significance of analytic and reflective attitudes. *Psychological Monographs*, 78(1):1–37.
- 156 – KAHNEMAN, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- 157 – KAUR, K., MAIDEN, N. & SUTCLIFFE, A. (1999). Interacting with virtual environments: an evaluation of a model of interaction. *Interacting with Computers*, 11:403–426.
- 158 – KEELE, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70(6):387–403.
- 159 – KIERAS, D. E. (1988). Towards a practical GOMS model methodology for user interface design, Dans *The Handbook of Human Computer Interaction*, pages 135–158. Amsterdam: North-Holland.
- 160 – KIERAS, D. E. & MEYER, D. E. (1997). An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 12(4):391–438.
- 161 – KIM, K. S. (2001). Implications of user characteristics in information seeking on the world wide web. *International Journal of Human Computer Interaction*, 13(3):323–340.
- 162 – KINKEAD, R. (1975). Typing speed, keying rates, and optimal keyboard layouts. Dans les actes de la conférence *the 19th Annual Meeting of the Human Factor Society*, pages 159–161.

- 163 – KITAMURA, Y., YEE, A. & KISHINO, F. (1996). Virtual object manipulation using dynamically selected constraints with real-time collision detection. Dans les actes de la conférence *VRST'96 Virtual Reality Software Technology*, pages 173–181.
- 164 – KITCHIN, R. A. (1994). Cognitive maps: what are they and why study them? *Journal of Environmental Psychology*, 14(1):1–19.
- 165 – KOLASINSKI, E. M. (1995). Simulator sickness in virtual environments. Rapport technique 1027, U.S Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- 166 – KOLSKI, C., EZZEDINE, H. & ABED, M. (2001). Développement du logiciel : des cycles classiques aux cycles enrichis sous l'angle des IHM, Dans *Analyse et Conception de l'IHM : Interaction Homme-Machine pour les SI 1*, pages 23–49. Informatique et systèmes d'information. Hermes.
- 167 – KOSSLYN, S. M. (1980). *Image and Mind*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- 168 – KOSSLYN, S. M. (1994). *Image and Brain - The Resolution of the Imagery Debate*. Cambridge, MA: MIT Press.
- 169 – KOSSLYN, S. M., BALL, T. M. & REISER, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4(1):47–60.
- 170 – KOVACS, B., GAUNET, F. & BRIFFAULT, X. (2004). *Les Techniques d'Analyse de l'Activité pour l'IHM*. Hermes Science Lavoisier.
- 171 – LANDAUER, T. K. (1962). Rate of implicit speech. *Perception and Psychophysics*, 15:646.
- 172 – LAVIOLA, J. J. (2000). A discussion of cybersickness in virtual environments. *SIGCHI Bulletin*, 32(1):47–56.
- 173 – LAWTON, C. A. (1994). Gender differences in way-finding strategies: relationship to spatial ability and spatial anxiety. *Sex Roles*, 30(11-12):765–779.
- 174 – LAZONDER, A. W., BIEMANS, H. J. A. & WOPEREIS, I. G. J. H. (2000). Differences between novice and experienced users in searching information on the world wide web. *Journal of the American Society for Information Science*, 51(6):576–581.
- 175 – LEADER, L. F. & KLEIN, J. D. (1996). The effects of search tool type and cognitive style on performance during hypermedia database searches. *Educational Technology Research and Development*, 44(2):5–15.
- 176 – LEMAIRE, P. (1999). *Psychologie Cognitive*. DeBoeck Université.
- 177 – LERCH, F. J., MANTEI, M. & OLSON, J. R. (1989). Skilled financial planning: the cost of translating ideas into action. Dans les actes de la conférence *CHI'89, Computer Human Interaction*, pages 121–126. ACM.
- 178 – LIKERT, R. & QUASHA, W. G. (1954). *Manuel du Paper Form Board*. Editions du Centre de Psychologie Appliquée.

- 179 – LIM, K. Y. & LONG, J. (1994). *The MUSE Method for Usability Engineering*. Cambridge: Cambridge University Press.
- 180 – LIMBOURG, Q. & VANDERDONCKT, J. (2004). Comparing task models for user interface design, Dans *The Handbook of Task Analysis for Human Computer Interaction*, chapitre 6, pages 135–154. Lawrence Erlbaum Associates.
- 181 – LINN, M. C. & PETERSEN, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: a meta-analysis. *Child Development*, 56(6):1479–1498.
- 182 – LIU, M. & REED, W. M. (1994). The relationship between the learning strategies and learning styles in a hypermedia environment. *Computers in Human Behavior*, 10(4):419–434.
- 183 – LOGIE, R. H. (1986). Visuo-spatial processing in working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 38A(2):229–247.
- 184 – LOGIE, R. H. (1995). *Visuo-Spatial Working Memory*. Erlbaum.
- 185 – LOGIE, R. H. & MARCHETTI, C. (1991). Visuo-spatial working memory: visual, spatial or central executive?, Dans *Mental Images in Human Cognition*, pages 105–115. Elsevier.
- 186 – LOGIE, R. H. & PEARSON, D. G. (1997). The inner eye and the inner scribe of visuo-spatial working memory: evidence from developmental fractionation. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9(3):241–257.
- 187 – LOHMAN, D. F. (1979). Spatial ability: review and re-analysis of the correlational literature. Rapport technique, Stanford University.
- 188 – LOHMAN, D. F. (1988). Spatial abilities as traits, processes and knowledge, Dans *Advances in the Psychology of Human Intelligence*, volume 4, pages 181–248. Hillsdale, N. J. : Erlbaum.
- 189 – LOHSE, G. (1991). A cognitive model for the perception and understanding of graphs. Dans les actes de la conférence *CHI'91*.
- 190 – LOMBARD, M. (2000). Measuring presence: a literature-based approach to the development of a standardized paper-and-pencil instrument. Dans les actes de la conférence *Presence 2000: The Third International Workshop on Presence*, pages 79–92.
- 191 – LOMBARD, M. & DITTON, T. (1997). At the heart if il all: the concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2).
- 192 – LOOMIS, J. M., BLASCOVICH, J. J. & BEALL, A. C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 31(4):557–564.
- 193 – LOURDEAUX, D. (2001). *Réalité Virtuelle et Formation: Conception d'Environnements Virtuels Pédagogiques*. Thèse de doctorat, École des Mines de Paris.
- 194 – LUCAS, K. & SHERRY, J. L. (2004). Sex differences in video game play: a communication-based explanation. *Communication Research*, 31(5):499–523.
- 195 – LYNCH, K. (1960). *The Image of the City*. MIT Press.

- 196 – MACKENZIE, I. S. (1991). *Fitts' Law as a Performance Model in Human-Computer Interaction*. Thèse de doctorat, University of Toronto: Toronto, Ontario, Canada.
- 197 – MACKENZIE, I. S. (1992). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7(1):91–139.
- 198 – MACKENZIE, I. S., SELLEN, A. & BUXTON, W. (1991). A comparison of input devices in elemental pointing and dragging tasks. Dans les actes de la conférence *CHI'91 Conference on Human Factors in Computing System*, pages 161–166. ACM.
- 199 – MACLEOD, C. M. & JACKSON, R. A. (1986). On the relation between spatial ability and field dependence. *Intelligence*, 10(2):141–151.
- 200 – MAGNENAT-THALMANN, N. & THALMANN, D. (2004). An overview of virtual humans, Dans *Handbook of Virtual Humans*, pages 1–25. John Wiley.
- 201 – MAHFOUDHI, A., ABED, M. & TABARY, D. (2001). From the formal specifications of user tasks to the automatic generation of the HCI specifications, Dans *People and Computers XV*, pages 331–347. London: Springer.
- 202 – MALLOT, H. A., GILLNER, S., VAN VEEN, S. & BÜLTHOFF, H. (1999). Behavioral experiments in spatial cognition using virtual reality. *Spatial Cognition Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 1404.
- 203 – MARCHIONINI, G. (1995). *Information Seeking in Electronic Environments*. Cambridge: Cambridge University Press.
- 204 – MARCHIONINI, G. & SHNEIDERMAN, B. (1988). Finding facts vs. browsing knowledge in hypertext systems. *IEEE Computer*, 21(1):70–80.
- 205 – MARENDAZ, C. (1990). Organisation perceptive, invariances, vicariances et différences, Dans *Cognition: l'Individuel et l'Universel*, chapitre 2, pages 59–89. PUF: Psychologie d'aujourd'hui.
- 206 – MCCORMICK, E. (1970). *Human Factors Engineering*. McGraw-Hill, Troisième édition.
- 207 – MCCOY, W. E. & FUNK, K. H. (1991). Taxonomy of ATC operator errors based on a model of human information processing. Dans JENSEN, R., éditeur: les actes de la conférence *the Sixth International Symposium on Aviation Psychology*, pages 532–537.
- 208 – MCCULLOCH, W. S. & PITTS, W. H. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5:115–133.
- 209 – MCGEE, J. S., VAN DER ZAAG, C., BUCKWALTER, J. G., THIEBAUX, M., VAN ROOYEN, A., NEUMANN, U., SISEMORE, D. & RIZZO, A. A. (2000). Issues for the assessment of visuospatial skills in older adults using virtual environment technology. *Cyberpsychology & Behavior*, 3(3):469–482.
- 210 – MCGEE, M. G. (1979). Human spatial abilities: psychometrics studies and environmental, genetic, hormonal and neurological influences. *Psychological Bulletin*, 86(5):889–918.

- 211 – MCKENNA, F. P. (1984). Measures of field dependence: cognitive style or cognitive ability? *Journal of Personality and Social Psychology*, 47(3):593–603.
- 212 – MCKENNA, F. P. (1990). Learning implications of field dependence, independence: cognitive style vs. cognitive ability. *Applied Cognitive Psychology*, 4:425–437.
- 213 – MEEHAN, M. (2000). An objective surrogate for presence: physiological response. Dans les actes de la conférence *Presence 2000 Workshop*, pages 27–28.
- 214 – MESSICK, S. (1976). *Individuality in Learning*. San Francisco: Jossey-Bass.
- 215 – MICHON, J. A. (1978). The making of the present: a tutorial review, Dans *Attention and Performance VII*, pages 89–109. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- 216 – MINE, M. R. (1995). Virtual environment interactions techniques. Rapport technique 95-018, University of North Carolina - Chapel Hill.
- 217 – MIYAKE, A., FRIEDMAN, N. P., RETTINGER, D. A., SHAH, P. & HEGARTY, M. (2001). How are visuospatial working memory, executive functioning and spatial abilities related? A latent variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(4):621–640.
- 218 – MOFFAT, S. C., HAMPSON, E. & HATZIPANTELIS, M. (1998). Navigation in a virtual maze: sex differences and correlation with psychometric measures of spatial ability in humans. *Evolution and Human Behavior*, 19:73–87.
- 219 – MOFFAT, S. D., ZONDERMAN, A. B. & RESNICK, S. M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging*, 22(5):787–796.
- 220 – MONTELLO, D. R., LOVELACE, K. L., GOLLEDGE, R. G. & SELF, C. M. (1999). Sex-related differences and similarities in geographic and environmental spatial abilities. *Annals of the Association of American Geographers*, 89(3):515–534.
- 221 – MORAY, N., BATES, A. & BARNETT, T. (1965). Experiments on the four-eared man. *Journal of the Acoustical Society of American*, 38:196–206.
- 222 – MORINEAU, T. (1996). *Adaptation Cognitive à un Environnement Virtuel, lors de Premières Immersions*. Thèse de doctorat, Université d'Angers - Psychologie.
- 223 – MORINEAU, T. (2000). Context effect on problem solving during a first immersion in a virtual environment. *Cahier de Psychologie Cognitive*, 19(1):533–555.
- 224 – MORRIS, N. & JONES, D. M. (1990). Memory updating in working memory: the role of the central executive. *British Journal of Psychology*, 81:111–121.
- 225 – NEISSER, U. (1967). *Cognitive Psychology*. Appleton - Century - Crofts.
- 226 – NEWELL, A. (1990). *Unified Theory of Cognition*. Haward University Press.
- 227 – NEWELL, A. & ROSENBLUM, P. S. (1981). Mechanisms of skill acquisition and the law of practice, Dans *Cognitive Skills and their Acquisition*, pages 81–135. NJ: Erlbaum.
- 228 – NEWELL, A. & SIMON, H. (1972). *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs.

- 229 – NIELSEN, E., JONG, H. S., OLSON, J. S., BIOLSI, K., RUETER, H. & MUTTER, S. (1993). The growth of software skill: a longitudinal look at learning and performance. Dans les actes de la conférence *CHI'1993*, pages 149–156. ACM.
- 230 – NOMA, H., SUGIHARA, T. & MIYASATO, T. (2000). Development of ground surface simulator for tele-merge system. Dans les actes de la conférence *IEEE-Virtual Reality 2000 Conference*, pages 217–224.
- 231 – NORMAN, D. A. (1983). Some observations on mental models, Dans *Mental Models*, pages 7–14. Lawrence Erlbaum Associates.
- 232 – NORMAN, D. A. (1998). *The Invisible Computer*. Cambridge, M. A. : The MIT Press.
- 233 – NORMAN, D. A. & DRAPER, S. (1986). *User Centered System Design: New Perspectives on Human-Computer Interaction*. Lawrence Erlbaum Associates.
- 234 – NORMAN, D. A. & SHALLICE, T. (1980). Attention to action: willed and automatic control of behavior. Rapport technique 99, University of California San Diego, Center for Human Information Processing.
- 235 – NORMAND, V. (1992). Task modelling in HCI: purposes and means. Rapport technique PTI/92-02, Thomson CSF, Division systèmes défense et contrôle.
- 236 – OGLE, T. (2002). *The Effects of Virtual Environments on Recall in Participants of Differing Levels of Field Dependence*. Thèse de doctorat, Faculty of the Virginia Polytechnic and State University.
- 237 – OHLMANN, T. (1990). Les systèmes perceptifs vicariants, Dans *Cognition: l'Individuel et l'Universel*, pages 21–58. Paris : Presses Universitaires de France.
- 238 – O'LAUGHLIN, E. M. & BRUBAKER, B. S. (1998). Use of landmarks in cognitive mapping: gender differences in self-report versus performance. *Personality and Individual Differences*, 24(5):595–601.
- 239 – OLTMAN, P. K., WITKIN, H. A., RASKIN, E. & KARP, S. A. (1971). *A Manual for the Group Embedded Figures Test*. Consulting Psychologists Press.
- 240 – PALMQUIST, R. A. & KIM, K. S. (2000). Cognitive style and on-line database search experience as predictors of web search performance. *Journal of the American Society for Information Science*, 51(6):558–566.
- 241 – PAPIN, J. P. & FUCHS, P. (2003). Les sens et les réponses motrices de l'homme, Dans *Le Traité de la Réalité Virtuelle*, chapitre 4, pages 123–180. Presses de l'Ecole des Mines de Paris, seconde édition.
- 242 – PARKINSON, A. & REDMOND, J. A. (2002). Do cognitive styles affect learning performance in different computer media? Dans les actes de la conférence *The ITiCSE'02, Innovation and Technology in Computer Science Education*, pages 39–43.

- 243 – PARSONS, T. D., LARSON, P., KRATZ, K., THIEBAUX, M., BLUESTEIN, B., BUCKWALTER, J. G. & RIZZO, A. A. (2004). Sex differences in mental rotation and spatial rotation in a virtual environment. *Neuropsychologia*, 42(4):555–562.
- 244 – PASQUIER, T., LE BOUEDEC, B., PAPIN, J. & TODESCHINI, L. (1999). Style de personnalité et influence sur les conduites d'apprentissage en environnement virtuel. Dans *Proceedings Journées ReViCo Réalité Virtuelle et Cognition*.
- 245 – PASSINI, R. (1992). *Wayfinding in Architecture*. Van Nostrand Reinhold.
- 246 – PATERNO, F. (1999). *Model Based Design and Evaluation of Interactive Application*. Berlin: Springer-Verlag.
- 247 – PATRICK, E., COSGROVE, D., SLAVKOVIC, A., RODE, J. A., VERRATTI, T. & CHISELKO, G. (2000). Using a large projection screen as an alternative to head-mounted displays for virtual environments. Dans les actes de la conférence *CHI 2000 Computer Human Interaction*, volume 2, pages 478–485.
- 248 – PAUSCH, R., PROFFITT, D. & WILLIAMS, G. (1997). Quantifying immersion in virtual reality. Dans les actes de la conférence *SIGGRAPH 97*, pages 13–18. ACM.
- 249 – PELLEGRINO, J. W. & KAIL, R. (1982). Process analysis of spatial aptitude, Dans *Advances in the Psychology of Human Intelligence*, volume 1, pages 311–365. Hillsdale, N.J., Lawrence Erlbaum Associates.
- 250 – PIAGET, J. (1957). *Biologie et Connaissance*. Gallimard.
- 251 – PITHERS, R. T. (2002). Cognitive learning style: a review of the field dependent-field independent approach. *Journal of Vocational Education and Training*, 54(1):117–132.
- 252 – PLAMONDON, R. & ALIMI, A. M. (1997). Speed accuracy trade-offs in target-directed movements. *Behavioral and Brain Sciences*, 20(2):279–349.
- 253 – PLATON (1940). La république VII, Dans *Oeuvres Complètes*. La Pléiade Gallimard. Traduction de Léon Robin.
- 254 – POUPYREV, I. & ICHIKAWA, T. (1999). Manipulating objects in virtual worlds: categorization and empirical evaluation of interaction techniques. *Journal of Visual Languages and Computing*, 10(1):19–35.
- 255 – POUPYREV, I., WEGHORST, S., BILLINGHURST, M. & ICHIKAWA, T. (1996). The go-go interaction technique: Non-linear mapping for direct manipulation in virtual reality. Dans les actes de la conférence *UIST'96*, pages 79–80.
- 256 – POUPYREV, I., WEGHORST, S., BILLINGHURST, M. & ICHIKAWA, T. (1997). A framework and tested for studying manipulation techniques for immersive VR. Dans les actes de la conférence *VRST'97 Virtual Reality Software and Technology*, pages 21–28. ACM.
- 257 – POUPYREV, I., WEGHORST, S., BILLINGHURST, M. & ICHIKAWA, T. (1998). Egocentric object manipulation in virtual environments empirical evaluation of interaction techniques. Dans

- les actes de la conférence *EUROGRAPHICS/SIGGRAPH Workshop on Graphics Hardware*, pages 41–52. Blackwell.
- 258 – PROTHERO, J. D. & HOFFMAN, H. G. (1995). Widening the field-of-view increases the sense of presence in immersive virtual environments. Rapport technique TR-95-2, Human Interface Technology Laboratory.
- 259 – PUGNETTI, L., MENDOZZI, L., ATTREE, E., BARBIERI, E., BROOKS, B., CAZZULLO, C., MOTTA, A. & ROSE, F. (1998a). Active versus passive exploration of virtual environments modulates spatial memory in MS patients: a yoked control study. *The Italian Journal of Neurological Sciences*, 19:424–430.
- 260 – PUGNETTI, L., MENDOZZI, L., ATTREE, E., BARBIERI, E., BROOKS, B., CAZZULLO, C., MOTTA, A. & ROSE, F. (1998b). Probing memory and executive functions with virtual reality, past and present studies. *Cyberpsychology & Behavior*, 1(2):151–161.
- 261 – PUGNETTI, L., MENDOZZI, L., MOTTA, A., CATTANEO, A., BARBIERI, E. & BRANCOTTI, A. (1995). Evaluation and retraining of adult's cognitive impairments: which role for virtual reality technology? *Computers in Biology and Medicine*, 25:213–228.
- 262 – PYLYSHYN, Z. W. (1984). *Computation and Cognition: Towards a Foundation for Cognitive Science*. MIT Press.
- 263 – QUÉAU, P. (1993). *Le Virtuel*. Champ Vallon, Seyssel.
- 264 – RABARDEL, P. (1995). *Les Hommes et les Technologies, Approche Cognitive des Instruments Contemporains*. Armand Colin.
- 265 – RASMUSSEN, J. (1986). *Information Processing and Human Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*. North Holland.
- 266 – RASMUSSEN, J., PEJTERSEN, A. M. & GOODSTEIN, L. P. (1994). *Cognitive Systems Engineering*. John Wiley and Sons.
- 267 – RETAUX, X. (2003). Presence in the environment: theories, methodologies and applications to video games. *PsychNology*, 1(3):283–309.
- 268 – RICHARDSON, J. A. & TURNER, T. E. (2000). Field dependence revisited I: intelligence. *Educational Psychology*, 20(3):255–270.
- 269 – RIDING, R. & RAYNER, S. (1998). *Cognitive Styles and Learning Strategies: Understanding Style Differences in Learning and Behaviour*. David Fulton.
- 270 – RIDING, R. J. (1991). *Cognitive Style Analysis*. Learning and Training Technology.
- 271 – RIDING, R. J. & CHEEMA, I. (1991). Cognitive styles: an overview and integration. *Educational Psychology*, 11(3-4):193–215.
- 272 – RIVA, G., BACCHETTA, M., BARUFFI, M. & MOLINARI, E. (2001). Virtual reality-based multidimensional therapy for the treatment of body image disturbances in obesity: a controlled study. *Cyberpsychology & Behavior*, 4(4):511–526.

- 273 – RORY, S. (1996). *The Design of the Virtual Environments*. McGraw-Hill.
- 274 – RYBARCZYK, Y. (2004). *Etude de l'Appropriation d'un Système de Téléopération dans l'optique d'une Coopération Homme-Machine*. Thèse de doctorat, Université d'Evry.
- 275 – SADALLA, E. K. & MONTELLO, D. R. (1989). Remembering changes in direction. *Environment & Behavior*, 21(3):346–363.
- 276 – SALBER, D. (1995). *De l'Interaction Homme-Machine Individuelle aux Systèmes Multi-Utilisateurs: l'Exemple de la Communication Homme-Homme Médiatisée*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- 277 – SALTHOUSE, T. (1991). Expertise as the circumvention of human processing limitations, Dans *Toward a General Theory of Expertise: Prospects and Limits*, pages 286–300. Cambridge University Press.
- 278 – SALWAY, A. F. S. & LOGIE, R. H. (1995). Visuospatial working memory, movement control and executive demands. *British Journal of Psychology*, 86(2):253–269.
- 279 – SALZMAN, M. C., DEDE, C. & BOWEN LOFTIN, R. (1999a). VR's frames of reference: a visualization technique for mastering abstract multidimensional information. Dans les actes de la conférence *CHI 99 Computer Human Interaction*, pages 489–495.
- 280 – SALZMAN, M. C., DEDE, C., LOFTIN, R. B. & CHEN, J. (1999b). A model for understanding how virtual reality aids complex conceptual learning. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(3):293–316.
- 281 – SANDSTROM, N. J., KAUFMAN, J. & HUETTEL, S. A. (1998). Males and females use different distal cues in a virtual environment navigation task. *Cognitive Brain Research*, 6(4):351–360.
- 282 – SAS, C. & O'HARE, G. (2001). Presence equation: an investigation into cognitive factors underlying presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(5):523–537.
- 283 – SATTERLY, D. (1976). Cognitive styles, spatial ability and school achievement. *Journal of Educational Psychology*, 68:36–42.
- 284 – SCAPIN, D. & PIERRET, C. (1989). MAD: une méthode analytique de description des tâches. Dans les actes de la conférence *Ingénierie des Interfaces Homme-Machine*.
- 285 – SCAPIN, D. L. & BASTIEN, J. M. C. (2001). Analyse des tâches et aide ergonomique à la conception: l'approche MAD*, Dans *Analyse et Conception de l'IHM: Interaction Homme Machine pour les SI 1*, chapitre 3. Hermes.
- 286 – SCAPIN, D. L. & PIERRET-GOLBREICH, C. (1990). Towards a method for task description: MAD, Dans *Work with Display Units 89*, pages 371–380. Elsevier Science Publishers.
- 287 – SCHMIDT, R. A. (1982). *Motor Control and Learning: a behavioral emphasis*. Champaign: Human Kinetics Publishers.

- 288 – SCHUBERT, T. W., FRIEDMAN, F. & REGENBRECHT, H. T. (1999). Embodied presence in virtual environments, Dans *Visual Representations and Interpretations*, pages 268–278. Springer Verlag London.
- 289 – SCHUEMIE, M. J., Van der STRAATEN, P., KRIJN, M. & Van der MAST, C. A. P. G. (2001). Research on presence in virtual reality: a survey. *Cyberpsychology & Behavior*, 4(2):183–201.
- 290 – SCHULTHEIS, M. T., HIMELSTEIN, J. & RIZZO, A. A. (2002). Virtual reality and neuropsychology: upgrading the current tools. *Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 17(5):378–394.
- 291 – SEBILLOTTE, S. (1994). Méthodologie pratique d'analyse de la tâche en vue de l'extraction de caractéristiques pertinentes pour la conception d'interfaces. Rapport technique 163, INRIA Rocquencourt.
- 292 – SHAH, P. & MIYAKE, A. (1996). The separability of working memory resources for spatial thinking and language processing: an individual differences approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 125(1):4–27.
- 293 – SHEPARD, R. N. & METZLER, J. (1971). Mental rotation of three dimensional objects. *Science*, 171(972):701–703.
- 294 – SHERIDAN, T. B. (1996). Further musings on the psychophysics of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(2):241–246.
- 295 – SHERMAN, J. A. (1967). Problem of sex differences in space perception and aspects of intellectual functioning. *Psychological Review*, 74(4):290–299.
- 296 – SLATER, M., USOH, M. & CHRYSANTHOU, Y. (1995). The influence of dynamic shadows on presence in immersive virtual environments. Dans les actes de la conférence *Virtual Environments'95*, pages 8–21.
- 297 – SLATER, M., USOH, M. & STEED, A. (1994). Depth of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2):130–144.
- 298 – SMITH, E. E. & JONIDES, J. (1997). Working memory: a view from neuroimaging. *Cognitive Psychology*, 33(1):5–42.
- 299 – SMITH, E. E., JONIDES, J., KOEPPE, R. A., AWH, E., SCHUMACHER, E. H. & MINOSHIMA, S. (1995). Spatial vs. object working memory: PET investigations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7:337–356.
- 300 – SMYTH, M. M. & PENDLETON, L. R. (1990). Space and movement in working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 42(2):291–304.
- 301 – SNODGRASS, J. G. & VANDERWART, M. (1980). A standardized set of 260 pictures: norms for name agreement, image agreement, familiarity, and visual complexity. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6(2):174–215.
- 302 – SOMMER, R. (1969). *Personal Space*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- 303 – SPEARMAN, C. (1923). *The Nature of Intelligence and the Principles of Cognition*. MacMillan.

- 304 – SPENCE, R. (1999). A framework for navigation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 51(5):919–945.
- 305 – SPERANDIO, J. C. & WOLFF, M. (2003). *Formalismes de Modélisation pour l'Analyse du Travail et l'Ergonomie*. Le Travail Humain PUF.
- 306 – SPERLING, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs: General and Applied*, 74(11):1–29.
- 307 – SPOTTS, J. X. C. & MACKLER, B. (1967). Relationship of field-dependent and field-independent cognitive styles to creative tests performance. *Perceptual and Motor Skills*, 24:239–268.
- 308 – STANNEY, K. (1998). Aftereffects and sense of presence in virtual environments: formulation of a research and development agenda. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(2):135–187.
- 309 – STANNEY, K. M., MOURANT, R. R. & KENNEDY, R. S. (1998). Human factors issues in virtual environments: a review of the literature. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(4):327–351.
- 310 – STECK, S. D. & MALLOT, H. A. (2000). The role of global and local landmarks in virtual environment navigation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(1):69–83.
- 311 – STERNBERG, S. (1975). Memory scanning: new findings and current controversies. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 27:1–32.
- 312 – STUMPF, H. & ELIOT, J. (1995). Gender-related differences in spatial ability and the k factor of general spatial ability in a population of academically talented students. *Personality and Individual Differences*, 19(1):33–45.
- 313 – SUTCLIFFE, A. & KAUR, K. (2000). Evaluating the usability of virtual reality user interfaces. *Behaviour & Information Technology*, 19(6):415–426.
- 314 – SWAN, J. E., GABBARD, J. L., HIX, D., SCHULMAN, R. S. & KIM, K. P. (2003). A comparative study of user performance in a map-based virtual environment. Dans les actes de la conférence *IEEE Virtual Reality 2003*, pages 259–266. IEEE Computer Society.
- 315 – TAN, D., GERGLE, D., SCUPELLI, P. & PAUSCH, R. (2003). With similar visual angles, larger displays improve spatial performance. Dans les actes de la conférence *CHI 2003 Computer Human Interaction*, pages 217–224. ACM.
- 316 – TAN, D. S. (2004). *Exploiting the Cognitive and Social Benefits of Physically Large Displays*. Thèse de doctorat, School of Computer Science Carnegie Mellon University Pittsburgh Pennsylvania.
- 317 – TAN, D. S., GERGLE, D., SCUPELLI, P. & PAUSCH, R. (2004). Physically large displays improve path integration in 3D virtual navigation tasks. Dans les actes de la conférence *CHI 2004, Conference on Human Factors in Computing Systems*.

- 318 – TAYLOR, H. A. & TVERSKY, B. (1992). Descriptions and depictions of environments. *Memory and Cognition*, 20(5):483–496.
- 319 – THORNDYKE, P. W. & GOLDIN, S. E. (1983). Spatial learning and reasoning skill, Dans *Spatial Orientation: Theory, Research and Application*, pages 195–217. New York: Plenum Press.
- 320 – THORNDYKE, P. W. & HAYES-ROTH, B. (1982). Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation. *Cognitive Psychology*, 14(4):560–589.
- 321 – THORNDYKE, P. W. & STASZ, C. (1980). Individual differences in procedures for knowledge acquisition from maps. *Cognitive Psychology*, 12(1):137–175.
- 322 – THURSTONE, L. L. (1938). *Primary Mental Abilities*. Chicago University Press.
- 323 – TINAJERO, D. C. & PARAMO, M. F. (1997). Field dependence-independence and academic achievement: a re-examination of their relationship. *British Journal of Educational Psychology*, 67(2):199–212.
- 324 – TISSEAU, J. (2001). Réalité virtuelle - autonomie in virtuo. Habilitation à Diriger des Recherches - Université de Rennes 1.
- 325 – TOLMAN, C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55(4):189–208.
- 326 – TRESCH, M. C., SINNAMON, H. M. & SEAMON, J. G. (1993). Double dissociation of spatial and object visual memory: evidence from selective interference in intact human subjects. *Neuropsychologia*, 31(3):211–219.
- 327 – TRICOT, A. & NANARD, J. (1998). Un point sur la modélisation des tâches de recherche d'informations dans le domaine des hypermédias, Dans *Les Hypermédias, Approches Cognitives et Ergonomiques*, pages 35–56. Hermès.
- 328 – TYNDIUK, F., THOMAS, G., LESPINET-NAJIB, V. & SCHLICK, C. (2004). Impact of large display on virtual reality task performance. Dans les actes de la conférence *AFRIGRAPH 2004*.
- 329 – USOH, M., CATENA, E., ARMAN, S. & SLATER, M. (2000). Using presence questionnaires in reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5):497–503.
- 330 – USOH, M. & SLATER, M. (1995). An exploration of immersive virtual environments. *Endeavour*, 19(1):34–38.
- 331 – VAN DER LINDEN, M., HUPET, M., FEYEREISEN, P., SCHELSTRAETE, M. A., BESTGEN, Y., BRUYER, R., LORIES, G., EL AHMADI, A. & SERON, X. (1999). Cognitive mediators of age-related differences in language comprehension and verbal memory performance. *Aging, Neuropsychology and Cognition*, 6(1):32–55.
- 332 – VANDENBERG, S. G. & KUSE, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47(2):599–604.
- 333 – VARELA, F. J. (1989). *Invitation aux Sciences Cognitives*. Le Seuil.

- 334 – VECCHI, T. & GIRELLI, L. (1998). Gender differences in visuo-spatial processing: the importance of distinguishing between passive storage and active manipulation. *Acta Psychologica*, 99(1):1–16.
- 335 – VICENTE, K. J., HAYES, B. B. & WILLIGES, R. C. (1987). Assaying and isolating individual differences in searching a hierarchical file system. *Human Factors*, 29(3):349–359.
- 336 – VICKERS, D. L. (1974). *Sorcerer's Apprentice: Head-Mounted Display and Wand*. Thèse de doctorat, University of Utah, Salt Lake City.
- 337 – VIDAL, M., AMORIM, M. A. & BERTHOZ, A. (2004). Navigating in a virtual three-dimensional maze: how do egocentric and allocentric reference frames interact? *Cognitive Brain Research*, 19(3):244–258.
- 338 – VIDAL, M., LIPSHITS, M., MCINTYRE, J. & BERTHOZ, A. (2003). Gravity and spatial orientation in virtual 3D-mazes. *Journal of Vestibular Research*, 13(4-6):273–286.
- 339 – VINCELLI, F., ANOLLI, L., BOUCHARD, S., WIEDERHOLD, B. K., BCIA, M. B. A., ZURLONI, V. & RIVA, G. (2003). Experiential cognitive therapy in the treatment of panic disorders with agoraphobia: a controlled study. *Cyberpsychology & Behavior*, 6(3):321–328.
- 340 – VOYER, D., VOYER, S. & BRYDEN, M. P. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: a meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, 117(2):250–270.
- 341 – WALLER, D. (1999). *An Assessment of Individual Differences in Spatial Knowledge of Real and Virtual Environments*. Thèse de doctorat, University of Washington.
- 342 – WALLER, D. (2000). Individual differences in spatial learning from computer-simulated environments. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6(4):307–321.
- 343 – WALLER, D., HUNT, E. & KNAPP, D. (1998). The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2):129–143.
- 344 – WALLER, D., KNAPP, D. & HUNT, E. (2001). Spatial representations of virtual mazes: the role of visual fidelity and individual differences. *Human Factors*, 43(1):147–158.
- 345 – WARE, C. (1990). Using hand position for virtual object placement. *The Visual Computer*, 6(5):245–253.
- 346 – WARE, C. (2000). *Information Visualization, Perception for Design*. Morgan Kaufmann Publishers.
- 347 – WAUGH, N. & NORMAN, D. A. (1965). Primary memory. *Psychological Review*, 72(2):89–104.
- 348 – WECHSLER, D. (1981). *Wechsler Adult Intelligence Scale - Revised*. The Psychological Corp.
- 349 – WECHSLER, D. (1991). *Échelle Clinique de Mémoire de Wechsler (forme révisée)*. Centre de Psychologie Appliquée.
- 350 – WELFORD, A. T. (1973). Attention, strategy and reaction time: a tentative metric, Dans *Attention and Performance IV*, pages 37–54. New York: Academic Press.

- 351 – WESTERMAN, S. J., COLLINS, J. & CRIBBIN, T. (2005). Browsing a document collection represented in two- and three-dimensional virtual information space. *International Journal of Human Computer Studies*, 62(6):713–736.
- 352 – WESTERMAN, S. J. & CRIBBIN, T. (2000). Mapping semantic information in virtual space: dimensions, variance and individual differences. *International Journal of Human Computer Studies*, 53(5):765–787.
- 353 – WICKENS, C. D. (1980). Processing resources in attention, Dans *Attention and Performance VIII*, pages 63–102. Lawrence Erlbaum.
- 354 – WICKENS, C. D. (1984). Processing resources in attention, Dans *Varieties of Attention*, pages 63–102. Academic Press.
- 355 – WICKENS, C. D. (1992). *Engineering Psychology and Human Performance*. Harper Collins Publisher, Seconde édition.
- 356 – WICKENS, C. D. & HOLLANDS, J. G. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance*. Hardcover, Troisième édition.
- 357 – WICKENS, C. D. & PREVETT, T. T. (1995). Exploring the dimensions of egocentricity in aircraft navigation displays. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 1(2):110–135.
- 358 – WITKIN, H. A. (1976). Cognitive style in academic performance and in teacher-student relations, Dans *Individuality in Learning*, pages 38–72. San Francisco: Jossey-Bass.
- 359 – WITKIN, H. A., MOORE, C. A., GOODENHOUGH, D. R. & COX, P. (1978). Les styles cognitifs dépendant à l'égard du champ et indépendant l'égard du champ et leurs implications éducatives. *L'Orientation Scolaire et Professionnelle*, 7(4):299–349.
- 360 – WITMER, B. G. & SINGER, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environment: a presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3):225–240.
- 361 – WOHWILL, J. (1981). Experimental, developmental, differential: which way the royal road to knowledge about spatial cognition? Dans *Spatial Representation and Behavior Across the Life Span: Theory and Application*. San Diego, CA: Academic Press.
- 362 – WOODWORTH, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review*, 3(13):1–114.
- 363 – YOUNG, R. (1983). Surrogates and mappings: two kinds of conceptual models for interactive devices, Dans *Mental Models*, pages 35–52. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- 364 – ZACKS, J. M., MIRES, J., TVERSKY, B. & HAZELTINE, E. (2000). Mental spatial transformations of objects and perspective. *Spatial Cognition and Computation*, 2(4):315–322.
- 365 – ZHAI, S. & MILGRAM, P. (1993). Human performance evaluation of manipulation schemes in virtual environments. Dans les actes de la conférence *VRAIS'93 IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pages 155–161.

- 366 – ZIMMERMANN, P. & FIMM, B. (1994). *Test for Attentional Performance*. PsyTest. Edition française de North, P., Leclercq, N., Crémel, P, Tassi, P & Jeromin, D.

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire d'ergonomie

Annexe 2 : Questionnaire sur les caractéristiques des sujets

ANNEXE A

Questionnaire d'ergonomie

Ce questionnaire d'ergonomie a été conçu pour évaluer l'utilisabilité des interfaces que nous avons utilisé: *IRI* et le *CAT*. Chaque sujet ayant utilisé une (ou les deux) de ces interfaces devaient compléter ce questionnaire. Le sujet devait répondre par **OUI**, **NON** ou **SANS AVIS**. Seules les réponses OUI et NON ont été comptabilisé pour le traitement de nos résultats. Cette échelle de notation en trois points a été proposée car un première version du questionnaire utilisant une échelle en 5 points ne donnait aucun résultat pertinent. Les réponses des sujets se concentrant sur le centre de l'échelle.

1. Le fonctionnement de l'interface est facile à comprendre?
2. Le fonctionnement de l'interface est facile à apprendre?
3. Les mouvements que vous pouvez effectuer sont facilement identifiables?
4. Avez vous eu des difficultés à réaliser des translations?
5. Avez vous eu des difficultés à réaliser des rotations?
6. Dans votre interaction, vous vous sentez précis?
7. Dans votre interaction, vous vous sentez rapide?
8. Vous avez effectué beaucoup de manipulation inutile, d'erreurs?
9. Quand, vous effectuez une action, le résultat est celui que vous souhaitez?

Pour le *CAT*, quatre questions supplémentaires étaient posées (à la demande du concepteur du *CAT*). Les résultats n'ont pas été présentés dans le mémoire de thèse. Les questions étaient les suivantes :

- Vous avez eu des difficultés à cause de mouvements physiquement impossibles à réaliser?
- Vous avez eu des difficultés à cause de la fatigue occasionnée par la manipulation de l'interface?
- Vous avez eu des difficultés à cause du manque de précision de l'interface?
- Vous avez eu des difficultés à cause de la vitesse des mouvements trop importantes?

ANNEXE B

Questionnaire sur les caractéristiques des sujets

Le questionnaire suivant a été complété par chaque sujet avant le début des expérimentations excepté les questions concernant le mal des simulateurs qui ont été posées aux sujets à la fin de l'expérience.

Sujet n° :

Date :

Prénom :

Sexe :

Age :

Latéralité :

Niveau d'études :

Cursus d'études :

Taille :

Expérience informatique :

Avez vous accès à un ordinateur chez vous ou chez vos parents? OUI - NON

Avez vous accès à un ordinateur sur votre lieu de travail? OUI - NON

Vous utilisez un ordinateur

Quotidiennement

Tous les deux jours

Une fois par semaine

Une fois par an

Jamais

Expérience en réalité virtuelle :

Utilisez vous des applications des réalité virtuelle (autre que des jeux vidéo)?

Expérience en jeu vidéo :

Combien de temps passez vous devant des jeux vidéo par semaine actuellement?

(Les jeux simples sur PC (solitaire, démineur, échec) ne sont pas considérés comme des jeux vidéo).

Au maximum de votre pratique de joueur, combien de temps passiez vous devant vos jeux vidéo par semaine?

Mal des simulateurs :

Pendant le test de réalité virtuelle, avez vous ressenti?

Un inconfort général Absent Léger Présent Sévère

Une fatigue Absent Léger Présent Sévère

Des douleurs aux yeux Absent Léger Présent Sévère

Des maux de tête Absent Léger Présent Sévère

Des maux de ventre Absent Léger Présent Sévère

Table des figures

1.1	Projection d'un environnement virtuel sur un écran hémicylindrique	8
1.2	Le triangle Immersion-Interaction-Imagination selon Burdea & Coiffet (1993)	9
1.3	L'interface entre un utilisateur et un environnement virtuel	11
1.4	Exemple de Visiocasque (Image courtesy: www.5DT.com)	13
1.5	Fonctionnement de la <i>CAVE</i>	14
1.6	Projection d'images sur un mur hémicylindrique	15
1.7	Table Virtuelle	15
1.8	Le Modèle des <i>Situations d'Activités Instrumentées</i> de Rabardel (1995)	17
1.9	Schéma de l'interaction en réalité virtuelle d'après Fuchs & Burkhardt (2003)	18
2.1	Exemple de représentation hiérarchique d'après Normand (1992)	26
2.2	Exemple de diagramme d'état représentant le déplacement d'un objet graphique avec une souris d'après Buxton (1990)	27
2.3	Extrait d'une description d'une tâche de réservation d'un billet d'avion selon la méthode <i>MAD*</i> issue de Diaper & Stanton (2004)	29
2.4	Les étapes de l'élaboration d'une action selon Norman & Draper (1986)	31
2.5	Modèle hiérarchique de la tâche de manipulation	35

2.6	Formalisation de la tâche de locomotion d'après Bowman <i>et al.</i> (1999)	37
2.7	Modèle hiérarchique de la tâche de locomotion	38
2.8	Modèle de navigation en environnement virtuel proposé par Bakker (2001)	40
2.9	Modèle de navigation de Wickens & Prevelt (1995)	41
2.10	Les cycles d'action et de navigation d'après Sutcliffe & Kaur (2000)	43
3.1	Une représentation schématique d'un système de traitement de l'information	46
3.2	Le Modèle du Processeur Humain d'après Card <i>et al.</i> (1983)	48
3.3	Modèle descriptif du traitement de l'information d'après Wickens & Hollands (2000)	51
3.4	Proposition de modèle simplifié pour étudier l'interaction homme-machine	51
3.5	Le modèle de mémoire de travail (Baddeley, 1986)	54
3.6	Le système de la boucle phonologique	55
3.7	Modèle simplifié permettant d'étudier l'interaction homme-machine	59
4.1	Le modèle des niveaux d'activités	78
5.1	Représentation schématique d'un individu en environnement réel	94
5.2	Référence égocentrique <i>vs.</i> référence exocentrique	95
5.3	Exemple de graphe hiérarchique représentant un environnement virtuel urbain	97
5.4	Les différents repères géométriques dans un environnement virtuel	98
5.5	Représentation schématique d'un utilisateur en environnement virtuel	100
5.6	Systèmes de référence égocentrique et exocentrique en environnement virtuel	101
5.7	Déplacement du point de vue ou déplacement de l'environnement?	103
5.8	Tâches réalisées par l'utilisateur pour chaque configuration	105
5.9	Exemple d'aide graphique pour repérer la position du point de vue	106
5.10	Modélisation de la tâche de locomotion identifiant les points problématiques pour l'utilisateur	107
5.11	Modélisation de la tâche de manipulation d'un objet virtuel identifiant les points problématiques pour l'utilisateur	108
5.12	Modélisation de la tâche de manipulation d'une scène identifiant les points problématiques pour l'utilisateur	109

5.13	Exemple d'aide graphique pour repérer la position et l'orientation de la scène	110
5.14	Modèle de l'interaction en environnement virtuel	111
5.15	Visualisation d'un environnement virtuel urbain avec <i>Cosmo Player</i>	114
5.16	Interface graphique de <i>Cosmo Player</i>	114
5.17	Modèle hiérarchique du <i>mode déplacement</i>	115
5.18	Modèle hiérarchique du <i>mode examen</i>	115
5.19	Diagramme de transitions pour l'interaction avec <i>Cosmo Player</i>	117
5.20	Vue après rotation sur le monde virtuel	118
5.21	Non alignement des repères du point de vue et de la scène tridimensionnelle .	119
5.22	Modèle hiérarchique de l'interface de locomotion d' <i>IRI</i>	121
5.23	Modèle hiérarchique de l'interface de manipulation d' <i>IRI</i>	122
5.24	<i>IRI - Interface à Représentation Imagée</i>	122
5.25	<i>Le CAT - Control Action Table</i> (Hachet, 2003)	124
5.26	Réalisation des translations et des orientations avec le <i>CAT</i> (Hachet, 2003) .	124
5.27	Diagramme de transitions pour l'interaction avec le <i>CAT</i>	125
5.28	Modèle hiérarchique de la locomotion avec le <i>CAT</i>	126
5.29	Modèle hiérarchique de la manipulation avec le <i>CAT</i>	126
6.1	Configuration d'interaction avec un petit ou un grand écran	134
6.2	La salle <i>Hémicyclia</i>	135
6.3	Chaises virtuelles	136
6.4	Illustration de la tâche de manipulation	137
6.5	Illustration de la tâche de locomotion amorcée	138
6.6	Interaction entre les facteurs <i>Tâche</i> et <i>Capacités Spatiales</i>	155
6.7	Interaction entre les facteurs <i>Interface</i> et <i>Capacités Spatiales</i>	156
7.1	Difficultés pour l'utilisateur en fonction de sa configuration spatiale	175

Liste des tableaux

2.1	Description du déplacement d'un curseur dans un éditeur de texte en utilisant la méthode <i>GOMS</i>	28
4.1	Principaux résultats expérimentaux concernant les capacités spatiales	70
4.2	Principales hypothèses découlant de l'étude des capacités spatiales	71
4.3	Principaux résultats expérimentaux concernant la dépendance-indépendance à l'égard du champ	76
4.4	Principales hypothèses découlant de l'étude de la dépendance-indépendance à l'égard du champ	76
4.5	Principaux résultats expérimentaux concernant l'expérience dans la tâche	81
4.6	Principales hypothèses découlant de l'étude d'expérience dans la tâche	81
4.7	Principaux résultats expérimentaux concernant les différences hommes / femmes	86
4.8	Hypothèses sur l'impact des caractéristiques de l'utilisateur sur la performance	87
5.1	Contraintes sur les déplacements en environnements réel et virtuel	98
5.2	Performances des sujets en fonction du mode d'interaction utilisé préférentiellement (m pour moyenne, σ , pour écart-type	120
6.1	Différentes études traitées dans ce chapitre	132

6.2	Hypothèses sur les performances des utilisateurs	133
6.3	Caractéristiques des écrans utilisés (h = hauteur ; l = largeur)	134
6.4	Tâches et Interfaces étudiées	139
6.5	Statistiques descriptives des performances en fonction des tâches et des interfaces (m : moyenne ; σ : écart-type)	140
6.6	Synthèse des résultats sur les performances des utilisateurs	141
6.7	Hypothèses concernant l'impact des caractéristiques cognitives de l'utilisateur sur la performance (\Rightarrow : impliquée dans ; MdT : Mémoire de Travail)	146
6.8	Outils d'évaluation des fonctions cognitives et notations utilisées	147
6.9	Scores composites pour évaluer les fonctions cognitives	151
6.10	Matrice des corrélations simples entre les facteurs cognitifs et les performances d'interaction (* p < 0,05 ; ** p < 0,01)	152
6.11	Corrélations partielles entre les facteurs cognitifs et les performances en réalité virtuelle (* p < 0,05 ; ** p < 0,01)	153
6.12	Statistiques descriptives pour l'étude <i>IRI-Locomotion</i> en fonction des groupes de capacités spatiales (m : moyenne ; σ : écart-type)	155
6.13	Statistiques descriptives pour l'étude <i>IRI-Manipulation</i> en fonction des groupes de capacités spatiales (m : moyenne ; σ : écart-type)	157
6.14	Statistiques descriptives pour l'étude <i>CAT-Locomotion</i> en fonction des groupes de capacités spatiales (m : moyenne ; σ : écart-type)	158
6.15	Synthèse des résultats sur l'impact des caractéristiques cognitives de l'utilisateur (\Rightarrow : impliquée dans ; \Leftrightarrow : reliée à)	159
6.16	Hypothèses sur l'impact de l'expérience en jeux vidéo et de la dépendance-indépendance du champ sur les performances	163
6.17	Performances des sujets en fonction de la tâche, de l'interface, de l'expérience en jeux vidéo et de la dépendance-indépendance à l'égard du champ (m : moyenne ; σ : écart-type)	165
6.18	Résultats sur l'impact des jeux vidéo et la dépendance-indépendance à l'égard du champ sur la performance	169
7.1	Profil des utilisateurs performants et peu performants dans nos expérimentations	179