

N° d'ordre : 2777

THÈSE

PRÉSENTÉE À

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DE MATHÉMATIQUES ET
D'INFORMATIQUE

Par **Martin HACHET**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : INFORMATIQUE

**Interaction avec des environnements virtuels affichés au moyen d'interfaces
de visualisation collective**

Soutenue le : 18 Décembre 2003

Après avis des rapporteurs :

Rapporteurs :

Sabine Coquillart . Directeur de recherche

Philippe Fuchs ... Professeur

Devant la commission d'examen composée de :

Pere Brunet Professeur

Sabine Coquillart . Directeur de recherche Rapporteur

Philippe Fuchs ... Professeur

Pascal Guitton ... Professeur

Christophe Schlick Professeur

Président et rapporteur du Jury

Plusieurs noms de produits présentés dans ce document sont des marques déposées. Plusieurs images font l'objet de Copyright.

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier Pascal Guitton sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. Il a su me motiver, m'encourager, me faire avancer. Il m'a surtout fait confiance et a toujours mis en œuvre les moyens nécessaires à la réalisation de mes travaux.

Je remercie aussi grandement Yves Couétard pour les nombreuses heures qu'il a consacrées à la conception, l'assemblage et la maintenance du prototype actuel du CAT (y compris pendant ses jours de repos!). Il a cru en notre interface et s'est investi pleinement, avec pour seule motivation de faire avancer le projet.

Je souhaite aussi remercier les rapporteurs et membres du jury, en particulier Philippe Fuchs, pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Merci à Florence Tyndiuk pour m'avoir aidé à mener à bien les expérimentations et pour ses conseils de cognitiennne. Merci à Patrick Reuter pour son aide et son soutien tout au long de ma thèse.

Merci à mes parents et à mes frères et sœur pour m'avoir permis d'arriver jusqu'ici. Merci à Stéphanie pour son soutien au quotidien.

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 1 |
| 1.1 | Motivations | 1 |
| 1.2 | Définitions | 2 |
| 1.3 | Positionnement | 3 |
| 1.3.1 | Interaction avec des EV et IHM | 4 |
| 1.3.2 | Environnements Virtuels et Réalité Virtuelle | 4 |
| 2 | Inspirations | 5 |
| 2.1 | Recommandations générales pour la conception de systèmes interactifs | 5 |
| 2.2 | Interaction avec un ordinateur | 5 |
| 2.2.1 | Taxonomies | 6 |
| 2.2.2 | Modèles de performances | 6 |
| 2.3 | Interfaces d'action 3D | 6 |
| 2.3.1 | Intérêt des interfaces d'action 3D | 6 |
| 2.3.2 | Modes de résistance | 7 |
| 2.3.3 | Fonction de transfert | 8 |
| 2.3.4 | Coordination | 9 |
| 2.3.5 | Comparaison des interfaces 3D | 9 |
| 2.4 | Techniques d'interaction pour les EV | 10 |
| 2.4.1 | Contrôle du point de vue | 10 |
| 2.4.2 | Manipulation et sélection | 10 |
| 2.4.3 | Contrôle du système | 12 |
| 2.5 | Interfaces haptiques | 12 |
| 2.6 | Interaction 2D dans un espace 3D | 14 |
| 2.7 | Conclusion | 15 |
| 3 | Les IVC : nouvelles contraintes pour l'interaction | 17 |
| 3.1 | Les IVC | 17 |
| 3.1.1 | Une visualisation collective | 17 |
| 3.1.2 | Technologie des IVC | 19 |
| | Surfaces de projection | 19 |
| | Vidéoprojecteurs | 19 |
| | Calculateurs graphiques | 20 |
| | Solutions intégrées | 20 |
| 3.1.3 | Utilisation des IVC | 22 |
| 3.2 | Caractéristiques des IVC pour l'interaction avec des EV | 23 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2.1 | Surface de visualisation de grande taille | 23 |
| 3.2.2 | Espace de travail de grande taille | 23 |
| 3.2.3 | Utilisation collective | 24 |
| 3.2.4 | Point de vue caméra partagé | 25 |
| 3.2.5 | Caractéristiques complémentaires | 25 |
| 3.2.6 | Recommandations pour l'interaction avec des EV affichés au moyen d'IVC | 26 |
| 3.3 | Les interfaces d'action existantes face aux IVC | 27 |
| 3.3.1 | La souris | 27 |
| 3.3.2 | Les écrans interactifs | 28 |
| 3.3.3 | Les pointeurs lasers | 28 |
| 3.3.4 | Les ordinateurs <i>tenus-dans-la-main</i> | 29 |
| 3.3.5 | Les interfaces d'action 3D isotoniques et les gants | 30 |
| 3.3.6 | Les interfaces d'action 3D isométriques | 32 |
| 3.3.7 | Interfaces d'actions à base de capture vidéo | 33 |
| 3.4 | Conclusion | 33 |
| 4 | CAT : une nouvelle interface | 35 |
| 4.1 | Approche | 35 |
| 4.2 | Réalisations physiques | 37 |
| 4.2.1 | Constructions expérimentales | 37 |
| 4.2.2 | Prototype actuel | 38 |
| | Rotations | 39 |
| | Forces | 41 |
| | Tablette graphique et boutons | 44 |
| 4.2.3 | Limitations | 44 |
| 4.2.4 | Futur prototype | 45 |
| 4.3 | Composante logicielle | 46 |
| 4.3.1 | Couche Basse | 46 |
| | Sensibilité des rotations | 46 |
| | Poids du plateau | 47 |
| | Taux de rafraîchissement et transfert des données | 49 |
| 4.3.2 | Couche de haut niveau | 49 |
| 5 | Interagir avec le CAT | 51 |
| 5.1 | Interaction 3D | 51 |
| 5.1.1 | Manipulation | 51 |
| 5.1.2 | Contrôle du point de vue | 52 |
| 5.2 | Interaction 2D | 55 |
| 5.2.1 | Le plateau virtuel | 55 |
| 5.2.2 | L'écran virtuel | 57 |
| 5.3 | Techniques d'interaction supplémentaires | 57 |
| 6 | Caractéristiques du CAT | 61 |
| 6.1 | Une interface adaptée aux IVC | 61 |
| 6.2 | Une structure physique avantageuse | 62 |
| 6.2.1 | Affordances et fonctions d'association | 62 |
| 6.2.2 | Retour utilisateur | 62 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6.2.3 | Contrainte | 62 |
| 6.2.4 | Ddls séparables et intégrables | 62 |
| 6.2.5 | Fatigue réduite | 62 |
| 6.2.6 | Système mécanique | 63 |
| 6.3 | Limitations | 63 |
| 6.4 | Comparaison avec les interfaces d'action existantes | 63 |
| 6.4.1 | Interfaces d'action 2D | 63 |
| 6.4.2 | Interfaces 3D isométriques | 63 |
| 6.4.3 | Interfaces 3D isotoniques | 64 |
| 6.4.4 | Tablettes-et-stylets | 64 |
| 7 | Evaluation | 65 |
| 7.1 | Méthodes d'évaluation | 65 |
| 7.2 | Expérimentations | 66 |
| 7.3 | Influence de la profondeur pour les tâches d'interaction 2D | 67 |
| 7.3.1 | Expérience | 67 |
| 7.3.2 | Tâche | 67 |
| 7.3.3 | Procédure | 68 |
| 7.3.4 | Résultats | 68 |
| 7.4 | Orientation d'un objet | 69 |
| 7.4.1 | Expérience | 69 |
| 7.4.2 | Tâche | 70 |
| 7.4.3 | Procédure | 70 |
| 7.4.4 | Résultats | 70 |
| 7.5 | Manipulation 3D précise | 72 |
| 7.5.1 | Expérience | 72 |
| 7.5.2 | Tâche | 72 |
| 7.5.3 | Procédure | 73 |
| 7.5.4 | Résultats | 73 |
| 7.5.5 | Préférences utilisateurs | 75 |
| 7.6 | Conclusion | 76 |
| 8 | Applications | 77 |
| 8.1 | CatViewer | 77 |
| 8.1.1 | Contrôle du système | 77 |
| 8.1.2 | Sélection d'objets | 78 |
| 8.1.3 | Manipulation | 78 |
| 8.1.4 | Navigaton | 78 |
| 8.1.5 | Edition et paramètres | 79 |
| 8.1.6 | Extensions | 79 |
| 8.2 | Géomarketing 3D | 80 |
| 8.2.1 | Le géomarketing | 80 |
| 8.2.2 | Modélisation des EV | 81 |
| 8.2.3 | Visualisation d'informations abstraites | 82 |
| 8.2.4 | Interaction | 82 |
| 8.3 | Théâtre interactif | 87 |
| 8.3.1 | Le scénario | 88 |

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| 8.3.2 | Mise en œuvre | 88 |
| 8.4 | Applications potentielles | 90 |
| 8.4.1 | Applications volumiques | 90 |
| 8.4.2 | CAO | 91 |
| 9 | Conclusion | 93 |
| 9.1 | Rappel du contexte | 93 |
| 9.2 | Contributions | 93 |
| 9.3 | Perspectives | 94 |

Table des figures

| | | |
|----|---|----|
| 1 | La Spacemouse | 7 |
| 2 | Le V-Wand | 8 |
| 3 | Taxonomie des interfaces d'action 3D | 9 |
| 4 | Taxonomie des techniques de contrôle du point de vue | 11 |
| 5 | Le C^3 pour le contrôle du système | 13 |
| 6 | Interaction 2D dans un EV au moyen d'une tablette transparente | 15 |
| 7 | Principe de la CAVE | 18 |
| 8 | Le VR Table | 18 |
| 9 | Le RC3300W de SGI | 20 |
| 10 | Hemicyclia | 21 |
| 11 | Le V5 d'Elumens | 21 |
| 12 | ElectricSky de Spitz | 22 |
| 13 | Influence du point de vue sur les techniques d'interaction utilisées | 26 |
| 14 | Translation d'un objet à partir d'une interface 3D isotonique | 31 |
| 15 | Les 6 degrés de liberté du plateau | 37 |
| 16 | Le premier prototype du CAT | 38 |
| 17 | Le deuxième prototype du CAT | 39 |
| 18 | Le prototype actuel du CAT | 40 |
| 19 | Les axes de rotation du CAT | 41 |
| 20 | Le dynamomètre à 6 composantes | 42 |
| 21 | Pont de wheastone | 43 |
| 22 | Perte d'un ddl entraînée par une orientation particulière du plateau du CAT | 45 |
| 23 | La connexion entre le CAT et l'Onyx passe par un PC | 46 |
| 24 | Algorithme de stabilisation des rotations | 47 |
| 25 | Influence du poids du plateau sur les forces récupérées par le dynamomètre (2D) | 48 |
| 26 | Deux exemples de curseur 3D utilisés avec le CAT | 50 |
| 27 | La Technique du <i>trackball ciblé</i> | 53 |
| 28 | Rotations dans le repère caméra | 54 |
| 29 | Repères cumulés caméra/plateau | 55 |
| 30 | Technique du glissement | 56 |
| 31 | Exemple d'interface graphique pour le contrôle du système | 58 |
| 32 | Coordination de 2 ddls | 66 |
| 33 | Pointage d'une cible 2D à l'aide du stylet | 68 |
| 34 | Tâche d'orientation | 70 |

| | | |
|----|---|----|
| 35 | Moyennes obtenues pour une tâche d'orientation | 71 |
| 36 | Tâche de manipulation | 73 |
| 37 | Moyennes d'inefficacité (%) | 75 |
| 38 | Préférences utilisateurs | 75 |
| 39 | Deux menus du CatViewer | 78 |
| 40 | Ecran virtuel de sélection | 79 |
| 41 | Représentation d'informations dans une application de géomarketing 2D | 80 |
| 42 | Organisation de la base de données des textures | 82 |
| 43 | Modification de l'ambiance de la ville en fonction de la base de données de textures choisie | 83 |
| 44 | Vues du modèle de Bordeaux | 84 |
| 45 | Exemple de représentation de données en 3D | 84 |
| 46 | Utilisation de spots lumineux pour la visualisation de zones d'influence de deux commerces | 85 |
| 47 | Localisation des pharmacies | 85 |
| 48 | Utilisation d'un EV comme décor de théâtre | 87 |
| 49 | Utilisation du CAT pour la navigation | 89 |
| 50 | Utilisation de pointeurs laser pour la sélection de cibles | 90 |
| 51 | Positionnement du CAT par rapport aux principales interfaces d'action existantes | 95 |

Chapitre 1

Introduction

1.1 Motivations

Le traitement automatique de l'information, a permis le développement d'applications complexes d'analyse, de traitement, ou encore de gestion de données. Les premières informations résultantes des calculs des ordinateurs furent d'abord accessibles à travers l'impression de rubans de papier. Puis des écrans ont été développés, pour permettre la communication de ces informations au moyen d'interfaces textuelles, puis graphiques.

Depuis quelques années, la Réalité Virtuelle utilise des interfaces matérielles spécifiques, et des ressources de calcul puissantes, pour immerger des utilisateurs dans des espaces de données réels ou imaginaires. Ces espaces de données, appelés Environnement Virtuels (EV), correspondent à des modèles tridimensionnels (3D) dans lesquels il est possible d'interagir en temps-réel.

Aujourd'hui, l'évolution des capacités des ordinateurs personnels, et particulièrement du matériel graphique, a conduit à une utilisation de plus en plus fréquente d'applications interactives 3D temps-réel. Nous avons choisi d'intégrer ces applications dans la thématique des EV, même si la notion d'immersion reste discutable pour ce type d'applications.

Parallèlement à l'évolution des capacités des ordinateurs, depuis une dizaine d'années, la résolution accrue des images calculées a permis le développement d'Interfaces de Visualisation Collective (IVC) pour la visualisation de ces EV. Ces interfaces, à base de grands écrans, permettent à plusieurs personnes localisées en un lieu unique, de visualiser une même image en un instant donné, avec une bonne immersion du regard. L'intérêt des IVC pour le travail de groupe débouche sur une implantation grandissante de ces interfaces au sein de nombreuses entreprises.

Par exemple, dans l'industrie automobile, les IVC sont utilisées lors des revues de projets. Les ingénieurs, designers, ou encore responsables commerciaux peuvent visualiser à l'échelle 1 des prototypes de voitures affichés sur des écrans de grandes dimensions. La visualisation collective de prototypes virtuels permet à différents utilisateurs de travailler conjointement. Cette utilisation collective des IVC permet de réduire les temps de conception, notamment en améliorant le processus de prise de décision.

Malgré les évolutions fascinantes des capacités des ordinateurs et des systèmes d'affichage, les interfaces pour l'interaction ont peu évolué depuis l'invention de la souris. La souris a été conçue dans les années 70 pour permettre à un utilisateur de déplacer un curseur sur un écran de taille réduite. Ce système s'est avéré très performant pour communiquer avec un ordinateur à travers des interfaces graphiques 2D à base de WIMP (Windows, Icons, Menus, Pointers).

Aujourd'hui, la souris est encore couramment utilisée pour les applications basées sur des EV, et pour les affichages sur des IVC, alors que cette interface n'est pas adaptée à de tels contextes. En particulier, les 2 degrés de libertés de la souris représentent un facteur limitant pour la manipulation et la visualisation de scènes 3D. Le mode de fonctionnement basé sur un déplacement sur une surface plane la rend peu efficace lorsqu'elle est utilisée avec des grandes surfaces de visualisation.

De nombreuses interfaces d'action ont été proposées pour répondre aux nouvelles contraintes liées aux applications modernes. Ces interfaces ont du mal à sortir des laboratoires de recherche et aucune d'entre elles n'a su s'imposer de manière aussi unanime que la souris s'est imposée pour les applications 2D.

Les ressources informatiques actuelles sont capables de restituer en temps réel des scènes 3D de plus en plus complexes sur de grandes surfaces de projection, avec une qualité de plus en plus grande. Par contre, lorsqu'on introduit l'Homme dans la boucle, ces performances en perpétuelle augmentation se voient radicalement ralenties par la difficulté qu'il existe pour permettre une interaction efficace entre les utilisateurs et les EV.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à ce problème d'interaction entre les utilisateurs et les EV, en particulier lorsque ces derniers sont affichés au moyen d'IVC. Dans le chapitre 2, nous présentons les thématiques qui ont inspiré notre travail, en nous basant sur la littérature existante. Nous étudions les caractéristiques des IVC ainsi que l'implication de ces caractéristiques sur les interfaces d'actions existantes dans le chapitre 3. Puis, nous proposons une nouvelle interface, le CAT, pour l'interaction avec des EV affichés au travers d'IVC. Nous présentons cette nouvelle interface dans le chapitre 4, tant sur le plan matériel que sur le plan logiciel. Dans le chapitre 5, nous développons les techniques d'interaction que nous utilisons. Après avoir étudié les caractéristiques du CAT dans le chapitre 6, nous présentons, dans le chapitre 7, plusieurs expérimentations pour son évaluation. Enfin, nous présentons des applications concrètes dans lesquelles elle est utilisée, dans le chapitre 8. Finalement, nos conclusions sont présentées dans le chapitre 9.

1.2 Définitions

Un **Environnement Virtuel (EV)** est un modèle 3D de données réelles ou imaginaires que l'on peut visualiser et avec lesquelles on peut interagir en temps-réel. Des informations sensibles complémentaires (sonores, tactiles...) peuvent enrichir ce modèle.

Une action est effectuée en **temps-réel**, lorsque le cerveau humain considère que le temps nécessaire à la réalisation de cette action est imperceptible. Par exemple, une visualisation temps-réel implique que le temps nécessaire entre l’affichage de deux images successives est suffisamment court pour que l’utilisateur perçoive cette suite d’images comme un mouvement continu.

L’**Interaction avec des EV** concerne l’échange d’information entre les utilisateurs et les EV. Les utilisateurs agissent sur des EV en y apportant des modifications. Les EV agissent sur les utilisateurs en leur fournissant des informations sensibles.

Une **Interface** est un ensemble matériel et logiciel qui permet l’interaction avec un EV. Une interface est composée d’interfaces d’action, d’interfaces de perception, et de techniques d’interaction.

Une **Interface d’Action** est une interface matérielle permettant aux utilisateurs d’agir sur un EV (souris, joystick, capteur de position...).

Une **Interface de Perception** est une interface matérielle permettant aux utilisateurs de percevoir un EV (écran, haut-parleur, interface haptique...).

Une **Technique d’Interaction** est une méthode permettant à un utilisateur d’effectuer une tâche d’interaction dans un EV. Une technique d’interaction est indépendante des interfaces d’action et de perception. Par exemple, la sélection d’un objet à travers sa projection sur l’image affichée peut être réalisée à partir d’une souris ou d’un pointeur laser sur un écran de bureau ou sur un écran de grande dimension : il s’agit de la même technique d’interaction.

Une **Interface de Perception Immersive** est une interface de perception qui isole de l’environnement réel un ou plusieurs sens de l’utilisateur, totalement ou partiellement.

L’**Immersion** est un terme utilisé pour décrire le sentiment d’appartenance à un environnement crédible, différent de l’environnement réel. L’immersion peut avoir lieu à partir d’un livre ou d’un film. Le terme présence est aussi utilisé pour parler d’immersion.

On parle d’**Interaction 3D**, lorsque les techniques d’interaction récupèrent en entrée des informations 3D (position + orientation dans l’espace). On parle d’**Interaction 2D** lorsque les techniques d’interaction récupèrent en entrée des informations 2D (position dans un plan).

1.3 Positionnement

Le travail présenté dans cette thèse se situe à la croisée de nombreux domaines de recherche parmi lesquels l’informatique graphique, la Réalité Virtuelle, les Interfaces Homme-Machine (IHM) ou encore les facteurs humains. Nous précisons ici les rapports entre notre thématique et les IHM d’une part, et la Réalité Virtuelle d’autre part.

1.3.1 Interaction avec des EV et IHM

Notre travail concerne l'interaction entre des utilisateurs et des EV. Alors que cette interaction n'est techniquement possible que par l'intermédiaire de machines, nous éviterons le terme d'IHM dans la suite de ce document. En effet, les IHM s'intéressent plutôt à l'échange d'information entre l'homme et la machine. Or, dans notre approche, nous cherchons à faire abstraction de la machine pour ne plus considérer que l'EV. Nous cherchons donc à répondre à des questions du type "comment déplacer cet objet?" plutôt que "comment signifier à la machine qu'il faut modifier l'état de l'application pour que cet objet soit déplacé?".

De la même manière, nous éviterons les termes périphériques d'entrée et périphériques de sortie et préférerons les termes interfaces d'action et interfaces de perception. Un "périphérique" n'est là que pour être raccordé à quelque chose de "principal" (l'ordinateur), indépendamment d'une application particulière. Une interface d'action (ou de perception) a pour but de permettre une interaction avec un EV, indépendamment des moyens techniques mis en oeuvre pour le calcul de cet EV.

1.3.2 Environnements Virtuels et Réalité Virtuelle

Sans chercher de définition formelle, nous dirons que la Réalité Virtuelle cherche à immerger un ou des utilisateurs dans des EV. Des solutions techniques permettent de favoriser cette immersion : interfaces de perception immersives, vision stéréoscopique, suivi des mouvements de la tête, interfaces haptiques... A travers les définitions que nous avons posées, un EV est défini de manière objective (modèle 3D + interaction + temps-réel), alors que la Réalité Virtuelle repose sur la notion subjective qu'est l'immersion. Ainsi, nous pouvons parler d'EV pour les applications 3D de bureau (modeleurs 3D, jeux...) car les 3 conditions nécessaires sont présentes. Ces applications n'entrent pas a priori dans le domaine de la Réalité Virtuelle. Par contre, de telles applications peuvent être considérées comme applications de Réalité Virtuelle, si elles tirent partie d'interfaces de perception immersives, étant donné qu'il y a une recherche d'immersion.

L'immersion et l'interaction sont les composantes essentielles de tout système de Réalité Virtuelle. Fuchs [FMP01] propose de distinguer trois niveaux pour l'analyse de l'immersion et de l'interaction (I2). Au niveau physique, les I2 sensori-motrices concernent l'échange d'informations entre l'homme et l'ordinateur. Cet échange est possible, en particulier, au travers d'interfaces comportementales, c'est-à-dire d'interfaces exploitant des comportements humains naturels. Les I2 mentales concernent les processus cognitifs mis en jeu par les utilisateurs, comme par exemple les schèmes ou les métaphores. Finalement, les I2 fonctionnelles s'attachent aux fonctionnalités de l'application. Ce schéma de référence permet la conception et l'évaluation d'applications de Réalité Virtuelle, la finalité de cette dernière étant de permettre à des personnes des activités sensori-motrices dans des mondes artificiels.

Notre approche diffère légèrement de la méthodologie proposée par Fuchs. Nous ne cherchons pas à concevoir spécifiquement des applications de "Réalité Virtuelle" dans lesquelles une étude rigoureuse des I2 fonctionnelles, puis mentales, puis sensori-motrices est nécessaire. Notre objectif est plutôt de favoriser le développement d'applications 3D interactives en proposant une interface d'action générique répondant aux contraintes des IVC.

Chapitre 2

Inspirations

Dans ce chapitre, nous présentons les grands axes de recherche qui ont influencé notre travail. Nous proposons un aperçu de la littérature pour chacun de ces thèmes.

2.1 Recommandations générales pour la conception de systèmes interactifs

Les Interfaces Homme-Machine ont fait l'objet de nombreuses études. Ces études ont conduit à des recommandations d'ordre général [Nie93] [HH93]. Parmi ces recommandations, on peut citer celles décrites par Norman dans son ouvrage *The design of everyday things* [Nor90]. Pour lui, quatre caractéristiques sont essentielles pour la conception de tout objet : les *affordances*, les *contraintes*, une bonne *fonction d'association (mapping)*, et un *retour utilisateur*. Les *affordances* peuvent être vues comme les possibilités qu'offre un objet pour effectuer une action. Par exemple, un loquet de fermeture de porte bien conçu devra indiquer par sa forme comment il faut l'utiliser pour fermer la porte sur laquelle il est monté (tourner, tirer, pousser...) . Les *contraintes* permettent de limiter les actions possibles sur un objet pour rendre les actions principales plus efficaces. Par exemple, un loquet qui se tourne ne devrait pas pouvoir être tiré en même temps. Une bonne fonction d'association implique que l'association entre une action sur un objet et l'action résultante dans le système soit cohérente. Lorsque l'on tire le loquet d'une porte fermée, on s'attend à ce que la porte soit déverrouillée. Le retour utilisateur nous informe que l'action a bien été effectuée. Au niveau d'un système de fermeture de porte, cela peut être fait au moyen d'un code de couleur ouvert/fermé.

2.2 Interaction avec un ordinateur

Dans le domaine des IHM, plusieurs chercheurs se sont concentrés sur les performances des utilisateurs pour l'interaction avec un ordinateur au moyen d'interfaces d'actions 2D (souris, tablettes, joysticks, etc). Les travaux existants s'organisent autour de deux grands thèmes. D'une part, l'évaluation des systèmes existants a mené à des taxonomies des interfaces. D'autre part, des modèles de performances ont été développés pour permettre la prédiction des performances des utilisateurs lors de tâches d'interaction.

2.2.1 Taxonomies

De nombreuses taxonomies d'interfaces d'action ont été proposées, parmi lesquelles celles de Foley et al., Buxton, et Card et al.

Foley, Wallace, et Chan ont classé les interfaces en fonction des tâches réalisables [FWC84]. Ces tâches sont la sélection, le positionnement, l'orientation, la définition de chemin, la quantification et l'édition de texte.

Buxton a basé sa taxonomie sur les attributs physiques des interfaces d'action (mouvements linéaires, ou autour d'axes de rotation), sur leur nombre de degrés de liberté (ddls), et sur leur mode de fonctionnement (relatif ou absolu) [Bux83].

Card, Mackinlay et Robertson se basent sur les travaux de Foley et al. et de Buxton pour la classification d'un grand nombre d'interfaces d'action [CMR90].

2.2.2 Modèles de performances

Les performances liées à l'utilisation de ces interfaces ont largement été étudiées. Par exemple, la loi de Fitts prédit le temps nécessaire pour le pointage d'une cible [Fit54]. Ce temps est appelé *IP* pour Indice de Performance. *IP* dépend de l'interface d'action utilisée, de la taille de l'objet, et de la distance qui sépare ce dernier de la position initiale. Card, English et Burr se sont basés sur cette loi pour déterminer expérimentalement les différences de performance entre plusieurs périphériques [CEB78]. Depuis, plusieurs études ont été menées autour de la loi de Fitts [Mac92][DM97]. De leur côté, Accot et Zhai ont fait évoluer cette loi pour prédire le temps nécessaire au parcours d'une trajectoire [AZ97]. Ils ont montré que les souris et les tablettes avaient des résultats comparables, meilleurs que les autres interfaces de pointage.

Les recherches autour des interfaces Homme-ordinateur ont conduit à d'autres modèles de prédiction des performances des utilisateurs. Parmi ces modèles, on peut citer le *Keystroke-level model* [CMN80]. Le principe consiste à décomposer une séquence d'actions d'interface en tâches unitaires auxquelles on affecte un temps de réalisation. La somme des temps des tâches unitaires donnera une approximation du temps de réalisation de la séquence d'actions. Les tâches unitaires peuvent correspondre à des mouvements de l'utilisateur (par exemple déplacer la souris) ou à des processus cognitifs (prise de décision pour effectuer une action).

2.3 Interfaces d'action 3D

Le besoin d'interagir efficacement avec des environnements 3D a mené au développement d'interfaces d'action 3D. L'apparition de ces interfaces a ouvert un nouveau thème de recherche dans le domaine des IHM.

2.3.1 Intérêt des interfaces d'action 3D

Certaines tâches peuvent être perçues comme *intégrales* et d'autres comme *séparables* [Gra74]. Par exemple, déplacer un objet dans l'espace est une tâche qui est perçue intégralement car on ne cherche pas à décomposer ce déplacement en terme de déplacements primitifs suivant chacun des axes. Par contre, modifier la couleur et la taille d'un objet sont des tâches qui sont perçues de manière séparable. Jacob et Sibert argumentent que le choix



Figure 1: La spacemouse de 3DConnexion [Spa]

d'une interface d'action doit dépendre de la structure de la tâche d'interaction [JS92]. Une expérimentation leur permet de montrer qu'une tâche intégrale à 3 degrés de libertés est réalisée avec une plus grande performance au moyen d'une interface d'action à 3 ddls (intégrale) plutôt qu'avec une interface d'action à 2 ddls couplée à un processus de changement d'état (séparable).

Dans l'espace 3D, un grand nombre de tâches sont intégrales. Manipuler des objets ou contrôler le point de vue de la caméra sont des tâches d'interaction qui nécessitent le contrôle de 6 ddls. Le nombre limité des ddls des interfaces classiques pour l'ordinateur a conduit à la création d'interfaces d'action dédiées à l'interaction 3D.

Tout d'abord, on peut noter des adaptations de la souris pour augmenter le nombre de ddls. C'est le cas de la *roller mouse* [Ven93] et de la *Rockin'mouse* [BBKF97]. Ensuite, des interfaces d'actions permettant de contrôler 6 ddls en même temps ont été développées pour l'interaction avec des objets 3D. Ces interfaces fonctionnent selon des modes de résistance isométriques ou isotoniques.

2.3.2 Modes de résistance

Les interfaces isométriques sont des interfaces sur lesquelles on applique des forces ou des couples. La *spacemouse* (Figure 1) ou la *Spaceball*(TM) sont des représentants de cette catégorie. Un mode de résistance isométrique implique que l'interface ne se déplace pas, ou peu ; on parle aussi d'interfaces auto-centrées.

Les interfaces isotoniques sont des interfaces sur lesquelles on applique des déplacements ou des rotations. Ces mouvements sont appliqués sans résistance, ou avec une résistance constante. Les interfaces isotoniques à 6 ddls utilisent généralement des capteurs de positions pour fonctionner (voir [WF02] pour le détail des technologies). Un exemple est le *Bat* de Ware [WJ88] ou le *V-Wand* présenté sur la figure 2. Pour les interfaces isotoniques à 6 ddls, on parle aussi de *souris volantes*. Hinckley et al. proposent un ensemble de recommandations quant à l'utilisation d'interfaces isotoniques [HPGK97].



Figure 2: Le V-Wand de Fakespace [VW]

Les différences d'efficacité entre ces deux modes de résistance ont été discutées. Pour Gibbs, les interfaces isométriques sont plus performantes car elles fournissent un retour à l'utilisateur plus important [Gib54]. Pour lui, ce retour est lié à la "décharge proprioceptive". Au contraire, Plouton argumente que les interfaces isotoniques fournissent un meilleur retour à l'utilisateur, car les déplacements dans l'espace leur fournissent des indices [Plo74]. Une troisième catégorie d'interfaces regroupe les interfaces qui fonctionnent sur un mode de résistance élastique. Ces interfaces permettent d'augmenter le retour utilisateur en autorisant un déplacement élastique [ZM93].

2.3.3 Fonction de transfert

Une fonction de transfert est un mécanisme qui fait correspondre aux mouvements effectués dans le système, les mouvements appliqués à une interface d'action. Cette fonction peut être d'ordres différents. Par exemple, une fonction de transfert d'ordre 0 fait correspondre directement les mouvements dans le système, aux mouvements de l'opérateur, à un facteur d'échelle près. Dans ce cas, on parle de *contrôle de position*. Une fonction de transfert d'ordre 1 associe les mouvements de l'opérateur à une vitesse dans le système ; on parle de *contrôle de vitesse*. Par exemple, déplacer un objet avec une interface isotonique peut être fait de façons différentes : en mode contrôle de position, déplacer l'interface dans une direction implique un déplacement proportionnel de l'objet ; en mode contrôle de vitesse, déplacer l'interface modifie la vitesse de déplacement de l'objet. L'objet cessera de se déplacer lorsque l'interface isotonique sera revenue dans sa position initiale. Des fonctions de transfert d'ordre supérieur pourraient être utilisées. Cependant, elles sont généralement moins performantes [MSR89].

Zhai et Milgram se sont intéressés aux relations entre les modes de résistance, les fonctions de transfert, et les performances des utilisateurs pour les interfaces d'action à 6 ddl. Ils ont montré que les interfaces isotoniques étaient plus performantes lorsqu'elles étaient utilisées en mode de contrôle de position plutôt qu'en mode de contrôle de vitesse, et inversement pour les interfaces isométriques [ZM93]. Par ailleurs, ils ont montré pour une tâche de manipulation,

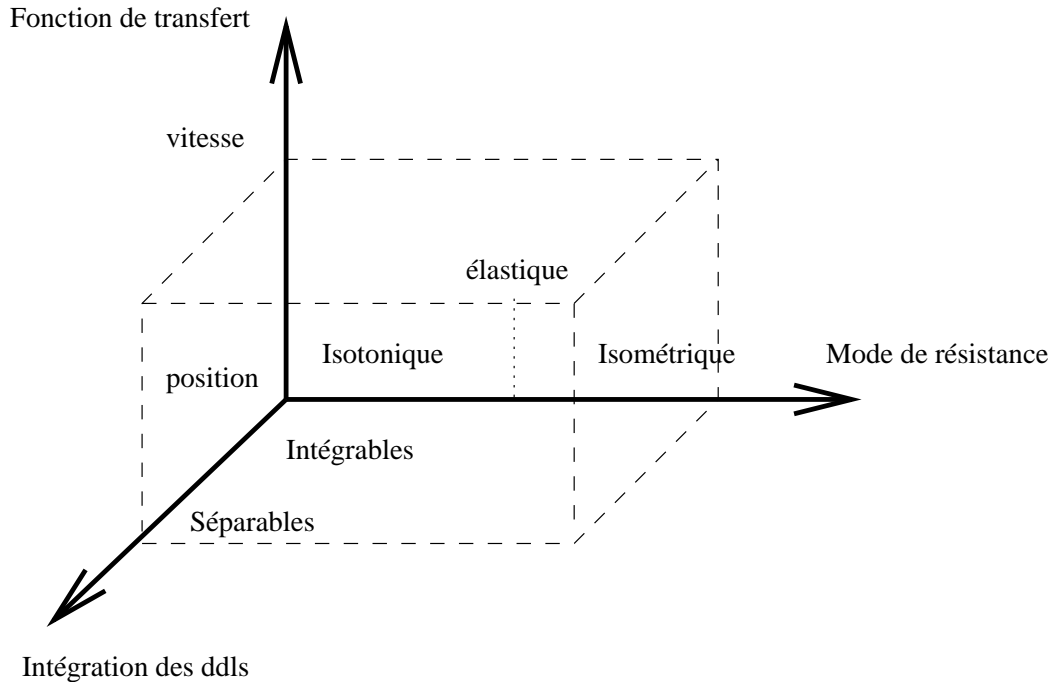


Figure 3: Taxonomie des interfaces d'action 3D, d'après Zhai [ZM94]

qu'une interface isotonique permettait des temps de réalisation plus courts qu'une interface élastique, mais que cette dernière permettait des mouvements plus coordonnés [ZM98]. La figure 3 illustre une taxonomie des interfaces d'action 3D proposée par Zhai et Milgram [ZM94].

2.3.4 Coordination

La coordination peut être vue comme la capacité à contrôler efficacement plusieurs variables en même temps. La coordination est donc un critère important pour l'évaluation de systèmes interactifs à base d'interfaces d'action à 6 ddl. Des expérimentations permettent de quantifier la coordination des mouvements des utilisateurs dans le système, comme nous le verrons dans le chapitre *Evaluation*.

2.3.5 Comparaison des interfaces 3D

Finalement, la plupart des interfaces d'action pour l'interaction 3D permettent de contrôler 6 ddl en même temps. Deux catégories d'interfaces se distinguent : les interfaces isotoniques qui agissent directement sur la position et l'orientation, et les interfaces isométriques qui contrôlent des vitesses de translation et de rotation. Zhai a noté un certain nombre d'avantages et d'inconvénients pour chacune de ces catégories [Zha98] : l'apprentissage des interfaces isotoniques est aisé et les tâches de manipulation peuvent être réalisées avec rapidité. Par contre, elles souffrent de certains inconvénients : mouvements limités, manque de coordination, fatigue induite, difficulté d'acquisition de l'interface. De leur côté, les interfaces isométriques améliorent la coordination, réduisent la fatigue, et leur acquisition est plus aisée. Par contre, ces interfaces souffrent d'une difficulté d'apprentissage, liée au fait que le contrôle de la vitesse

est une compétence acquise. De plus, le retour utilisateur offert par ce type d'interfaces est très limité.

2.4 Techniques d'interaction pour les EV

La réalisation de tâches d'interaction se fait à l'aide d'interfaces d'action, d'interfaces de perception, et de techniques d'interaction. Ces trois composantes sont a priori indépendantes, même si elles sont souvent fortement liées.

Les tâches d'interaction dans un EV peuvent être multiples, cependant elles sont généralement regroupées selon quatre grandes catégories [Bow99] :

- le *contrôle du point de vue*,
- la *manipulation*,
- la *sélection*,
- le *contrôle du système*.

2.4.1 Contrôle du point de vue

Le contrôle du point de vue est l'une des composantes de la navigation, la deuxième étant la recherche de chemin (wayfinding). Le contrôle du point de vue concerne la partie motrice de la tâche, alors que la recherche de chemin concerne le processus cognitif qui va amener au déplacement du point de vue. Darken et Sibert se sont intéressés à la recherche de chemin [DS93][DS96]. Une de leurs contributions a été de montrer que l'utilisation de cartes dans des EV pouvait améliorer les performances lors de tâches de navigation.

En ce qui concerne le contrôle du point de vue, plusieurs métaphores ont été proposées. Mackinlay et al. désignent une cible dans la scène pour déplacer le point de vue jusqu'à l'objet choisi [MCR90]. Ware et al. proposent trois métaphores : *scène-dans-la-main*, *contrôle de véhicule*, et *globe-oculaire-dans-la-main* [WO90]. La métaphore scène-dans-la-main consiste à modifier le point de vue sur la scène en manipulant la scène elle-même. Le principe de la métaphore du contrôle de véhicule est de "voler" dans la scène, comme on le ferait si on conduisait un véhicule. La métaphore globe-oculaire-dans-la-main permet de déplacer directement la caméra, comme si on la tenait dans la main. Une autre approche a été proposée par Stoakley et al. à travers la métaphore du *Monde-En-Miniature* qui consiste à interagir sur une représentation miniature de la scène [SCP95]. Bowman Koller et Hodges ont proposé une méthodologie pour l'évaluation des techniques de contrôle de la caméra pour les EV immersifs [BKH98]. Ils aboutissent à la taxonomie présentée en figure 4.

Une approche différente pour le contrôle du point de vue consiste à utiliser des interfaces spécialisées pour la locomotion comme un tapis roulant [BIS02][NSM00]. Les tapis roulants se basent sur le schème de la marche, c'est à dire qu'ils exploitent une compétence humaine acquise pour la réalisation d'une tâche d'interaction.

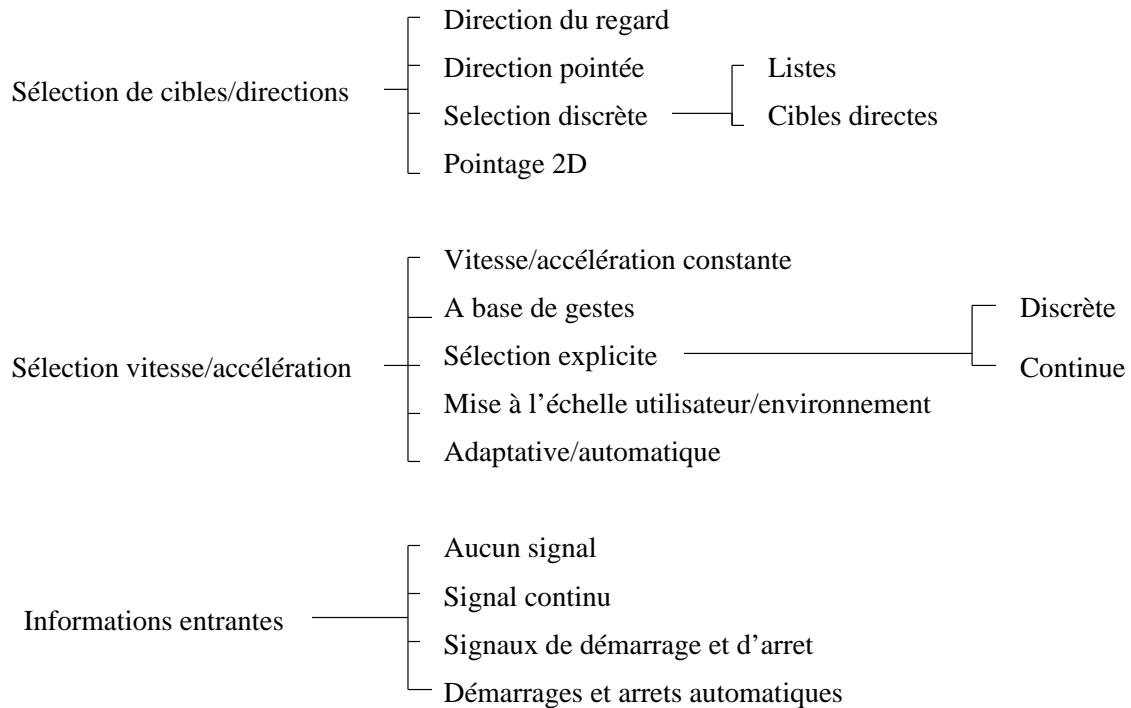


Figure 4: Taxonomie des techniques de contrôle du point de vue, selon Bowman et al. [BKH98]

2.4.2 Manipulation et sélection

Différentes techniques d'interaction permettent la sélection et la manipulation d'objets 3D. Ces techniques s'organisent autour du type d'interfaces d'action utilisées, à savoir les interfaces 2D et les interfaces 3D.

Pour le premier type d'interface, la sélection se fait généralement à travers la projection de l'objet sur l'écran. Pour ce qui est de la manipulation, Bier a initié l'utilisation de curseurs 3D connus sous le nom de Jack [Bie86][Bie90]. Chen et al. ont décrit des techniques pour travailler en 3D à partir d'interfaces d'action 2D, notamment à l'aide d'un trackball virtuel [CMS88]. Ces approches ont été reprises au sein de la bibliothèque 3D OpenInventor [OIV]. Des techniques supplémentaires sont résumées par Hand [Han97].

Une littérature différente concerne l'interaction 3D pour la manipulation et la sélection, notamment lorsque des interfaces isotoniques sont utilisées. Lorsque l'objet de l'EV est considéré comme proche de l'utilisateur, une interaction "naturelle" peut être utilisée; c'est à dire que l'utilisateur sélectionne un objet virtuel en "l'attrapant" directement. Une fois l'objet attrapé, l'utilisateur le manipule comme il le ferait si l'objet était réel. Pour ce type d'interaction, les interfaces d'action couramment utilisées sont des gants équipés de capteurs de position, et la métaphore utilisée est celle de la main virtuelle. Robinett et Holloway propose des outils d'implémentation pour ce type d'interaction [RH92].

Dès lors que les objets ne sont pas directement accessibles, il est nécessaire d'utiliser des techniques d'interaction pour la sélection et la manipulation des objets virtuels. Parmi ces

techniques, on peut citer le *lancer de rayon* (*ray casting*) qui consiste à sélectionner et manipuler un objet dans la scène, au moyen d'un rayon virtuel [JMF94][Min95]. Comme il est difficile de sélectionner des petits objets au moyen du lancer de rayon, cette technique a été étendue en remplaçant le rayon de sélection par un cône de sélection [Lia94][FHZ96]. Poupyrev a proposé une technique basée sur l'extension d'un bras virtuel, le *go-go* [PBWI96]. D'autres approches consistent à effectuer des changements d'échelle entre l'objet considéré et la scène. C'est le cas notamment de la technique *HOMER* [BH97]. Mine et al. tirent parti de la proprioception pour la manipulation d'objets [MJS97]. Plusieurs études ont été menées pour évaluer les différences de performances entre différentes techniques de sélection et de manipulation [BH97][PWBI97]. Il est à noter que certains auteurs proposent d'ajouter des contraintes dans les EV pour améliorer la manipulation des objets [BH95][KYK96].

2.4.3 Contrôle du système

Pour le contrôle du système, les WIMP (Windows, Icons, Menus, Pointers) situés en périphérie de l'écran, se sont imposés comme standard pour les applications de bureau basées sur des interfaces d'action 2D. Dès lors que les EV sont visualisés au moyen d'interfaces de perception immersives, notamment au travers d'une visualisation stéréoscopique, les WIMP classiques ne sont souvent plus utilisables.

Plusieurs solutions ont été proposées pour permettre le contrôle du système dans des EV immersifs. Certaines applications utilisent des interfaces graphiques 2D affichées sur des fenêtres positionnées dans l'espace 3D. Ces fenêtres peuvent être attachées à l'interface d'action, au point de vue de la caméra, à l'utilisateur, à un objet particulier, ou elles peuvent flotter dans l'environnement sans point d'attache particulier. L'attachement des fenêtres 2D dans l'espace 3D a initialement été discuté par Feiner et al. [FMHS93]. La sélection d'entités sur ces fenêtres positionnées dans l'espace 3D se fait généralement au moyen d'interfaces isotoniques 3D, soit directement, soit à travers un rayon virtuel lancé dans l'environnement. Wloka et Greenfield proposent de faire correspondre la position des fenêtres 2D dans l'EV à la position de l'interface d'action dans l'environnement réel [WG95]. Nous verrons que l'utilisation de surfaces physiques peut être bénéfique à l'utilisation d'interfaces graphiques 2D dans un espace 3D.

Des menus 3D "*tenu-dans-la-main*" ont été proposés pour une utilisation avec des gants. C'est le cas par exemple du *Command & Control Cube (C³)* de Grosjean et Coquillart [GC01]. Le *C³* adapte le principe des "Marking Menus" [KB94] à la 3D. Cette interface, illustrée en figure 5, permet de contrôler le système au moyen de cubes affichés à proximité de la main de l'utilisateur.

Finalement, d'autres approches utilisent la voix ou la reconnaissance de geste pour le contrôle du système [LaV99][Bil98].

2.5 Interfaces haptiques

Les interfaces haptiques cherchent à stimuler le sens du toucher des utilisateurs. Par conséquent, les interfaces d'action haptiques sont aussi des interfaces de perception. On distingue

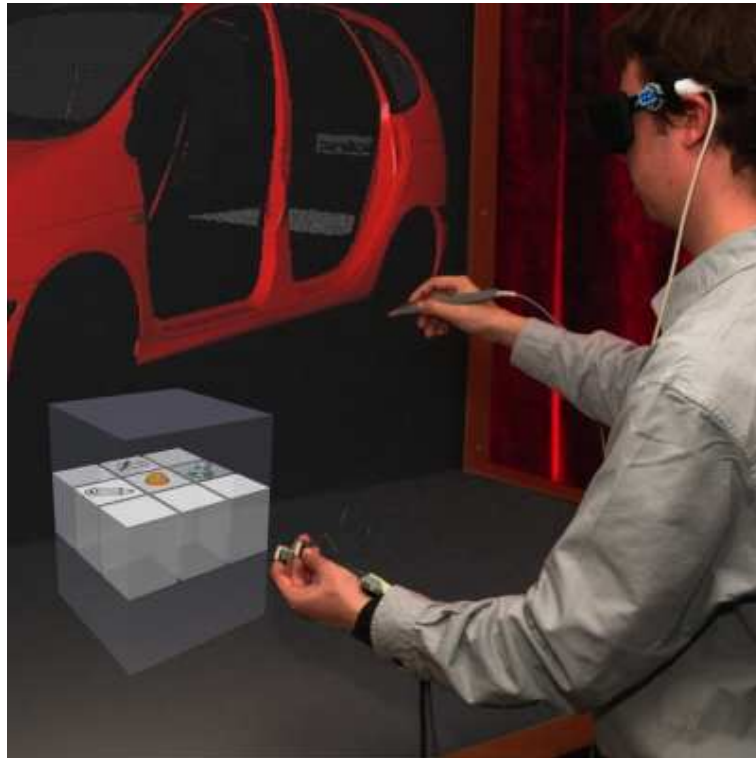


Figure 5: Le C^3 pour le contrôle du système

deux grandes catégories d'interfaces haptiques : les interfaces haptiques actives et les interfaces haptiques passives. Ces interfaces fournissent un retour tactile (contact, pression, texture, température) ou un retour d'effort (forces).

Les stimuli sensoriels fournis par les interfaces haptiques actives sont contrôlés par un ordinateur. Généralement, la partie physique d'une telle interface est constituée de bras articulés, dont les liaisons sont équipées de moteurs. Par exemple, les chercheurs de l'Université de Caroline du Nord ont travaillé autour de ce type d'interface à travers le projet GROPE [JOYBK90]. Aujourd'hui, des interfaces de bureau permettent un retour d'effort. C'est le cas du célèbre *PHANTOM* [MS94], ou du DigiHaptic qui offre un retour d'effort sur trois degrés de libertés [CPCS03]. Le retour haptique peut aussi avoir lieu à travers des gants spécialisés, comme le Rutger Master [BPBB96].

Une autre approche pour le retour d'effort consiste à contraindre les mouvements des mains de l'utilisateur par un système de fils et de moteurs. C'est le cas du *SPIDAR* [IS94][WKS99], et de ses adaptations sur grands écrans [BIS00][Tar03].

Les interfaces d'action haptiques passives fournissent des stimuli sensoriels uniquement par leurs formes, leurs textures ou leurs propriétés intrinsèques. Elles ne sont pas contrôlées par l'ordinateur. Pour une application volumétrique de neurochirurgie, Hinckley et al. ont utilisé de telles interfaces qu'ils ont appelé "*accessoires*" (*props*) [HPGK94]. Dans leur application, le cerveau virtuel est déplacé à l'aide d'une tête de poupée, alors qu'une plaque de plexiglas

leur permet de déplacer un plan de coupe. Cette interface donne la possibilité d'explorer intuitivement des données neurologiques. D'après Hoffman, toucher des objets virtuels en utilisant une augmentation tactile augmente le réalisme des EV [Hof98]. Ware et Rose ont montré que la forme de l'accessoire n'influencait pas les performances des utilisateurs pour une tâche de manipulation [WR99]. Par conséquent, la forme des accessoires peut différer de la forme précise des objets virtuels considérés.

Les interfaces tangibles tirent partie du retour haptique passif à travers des éléments physiques que les utilisateurs manipulent. Par exemple, Fitzmaurice propose l'utilisation de "briques" pour la manipulation intuitive et précise d'objets sur un plan [Fit96]. Les *activeCubes* de l'université d'Osaka sont des éléments emboîtables qui permettent de faire des assemblages simples [KIMK00]. Lagardeur et al. utilisent les interfaces tangibles pour l'assemblage mécanique en CAO [LGC]. L'interface à base de Lego de Ayers et Zeleznik est un autre exemple d'interfaces tangibles [AZ96].

Finalement, il faut noter la présence de travaux récents sur le retour pseudo-haptique, qui consiste à simuler un retour haptique à travers des informations visuelles [LCK⁺00][LBCC01].

2.6 Interaction 2D dans un espace 3D

Alors que l'interaction 3D est adaptée à de nombreuses tâches, elle n'est pas toujours la meilleure solution pour l'interaction dans un EV. Une alternative consiste à utiliser des techniques d'interaction 2D, c'est à dire des techniques se basant sur des informations en entrées 2D. On parle alors d'interaction 2D. L'interaction 2D a pour avantages de permettre des mouvements précis et de simplifier certaines tâches d'interaction qui sont difficiles à réaliser en 3D, comme par exemple, l'écriture d'annotations ou la sélection d'objets.

ErgoDesk [FLZ98] est un exemple d'interface qui intègre l'interaction 2D dans un environnement 3D. ErgoDesk utilise un système de projection stéréoscopique pour la visualisation 3D, et tire partie de l'interaction 2D au travers du modèle conceptuel de modélisation *Sketch* [ZHH96]. Un autre exemple est l'interface proposée par Serra et al. qui permet de travailler confortablement, avec précision, sur des données volumétriques de médecine [SHGG⁺99]. Cette interface utilise un plan d'interaction 2D sous l'espace d'interaction 3D.

Un ensemble de travaux se base sur l'utilisation de *tablettes* dans un EV pour permettre une interaction 2D. Une tablette est une surface physique que l'utilisateur tient dans une main, l'autre main se chargeant de manipuler un stylet. La position de la tablette et du stylet sont capturées, ce qui permet d'afficher des informations visuelles dans l'EV, à des positions correspondantes. La surface physique offerte par la tablette permet d'effectuer des tâches d'interaction 2D avec précision. Les tablettes ont initialement été développées pour les visiocasques. C'est le cas du *Virtual NotePad* de Poupyrev et al. [PNW98], du système *3D Palette* de Billingham et al. [BBMP97], ou du système *HARP* de Lindeman et al. [LSH99]. Une autre série de travaux concerne l'utilisation de palettes transparentes pour une utilisation avec des systèmes d'affichage par projection sur un écran. C'est le cas du *Virtual Palette* de Coquillart et Wesche [CW99] ou des accessoires transparents de Schmalstieg et al. [SES99],



Figure 6: Interaction 2D dans un EV au moyen d'une tablette transparente

illustrés en figure 6. Enfin, Szalavari et al. Gervautz utilisent le *Personal Interaction Panel (PIP)* dans un contexte de réalité augmentée [SG97].

L'intérêt principal des tablettes est de permettre un contrôle aisé du système dans des environnements immersifs. Lindeman et al. ont montré que la surface physique offerte par les palettes permettait d'améliorer les performances des utilisateurs [LSH99]. Au-delà du contrôle du système, les tablettes peuvent être utilisées pour des tâches d'interaction variées. Encarnaç o et al. utilisent le *Sketchpad* pour de la modélisation rapide d'objets basée sur de la reconnaissance de gestes [EBSC99]. A partir du concept de *lentilles magiques* [BSP+93] Stoev et al. utilisent le *PIP* pour des tâches de navigation [SSS01]. Bowman et al. ont utilisé plusieurs techniques d'interaction au sein d'une application immersive [BWH98].

2.7 Conclusion

De nombreux travaux ont été effectués autour de la thématique de l'interaction. Pour le développement d'une interface d'interaction avec des EV, nous retenons quelques principes généraux.

Tout d'abord, les principes fondamentaux des IHM traditionnelles doivent être pris en considération. En particulier, nous retiendrons l'idée qu'une interface doit offrir des affordances et une bonne fonction d'association. Des contraintes peuvent améliorer les performances de l'interface et le retour utilisateur est primordial.

Même si la problématique de l'interaction avec des EV diffère de celle des interfaces Homme-ordinateur classiques, il est possible de s'inspirer de certains concepts généraux développés sous l'ère "clavier-souris". C'est notamment le cas pour l'évaluation des interfaces.

Plus récemment, des travaux se sont concentrés sur l'interaction 3D. Il est apparu que le contrôle simultané de 6 degrés de libertés était indispensable pour de nombreuses tâches d'interaction. Par contre, le contrôle de 6 ddls en même temps n'est pas une tâche aisée.

Plusieurs interfaces d'action ont été proposées, avec leurs avantages et leurs inconvénients. Les auteurs s'accordent à dire qu'il n'existe pas véritablement d'interfaces standards et universelles pour l'interaction 3D.

Des techniques d'interaction doivent être associées aux interfaces d'action pour l'interaction avec des EV. Ces techniques s'organisent suivant les tâches de contrôle du point de vue, de manipulation, de sélection et de contrôle du système. De nombreuses techniques d'interaction ont été proposées pour chacune de ces catégories.

Les interfaces haptiques permettent de percevoir les EV au moyen du sens du toucher. De plus en plus de systèmes cherchent à introduire une composante haptique pour améliorer les performances des utilisateurs. Cette approche nous semble très prometteuse.

Enfin, des travaux récents ont pour but d'intégrer des techniques d'interaction 2D dans des espaces 3D. L'intérêt de ces techniques est de rendre certaines tâches d'interaction plus faciles à réaliser. Par conséquent, l'interaction 2D est une piste à explorer, le " tout 3D " ne semblant pas être une solution.

Nous venons de présenter les principes généraux de l'interaction avec des EV. Nous allons maintenant nous intéresser à l'interaction avec des EV pour un type particulier d'interfaces de perception : les IVC.

Chapitre 3

Les IVC : nouvelles contraintes pour l'interaction

L'utilisation d'IVC devient de plus en plus commune. Nous présentons, dans la première partie de ce chapitre, ce nouveau type d'interfaces de perception. Ensuite, nous nous intéressons aux IVC pour l'interaction avec des EV. Après une étude des caractéristiques des IVC, nous proposons une liste de recommandations pour l'interaction avec des EV. Finalement, à partir de ces recommandations, nous montrons que les interfaces d'actions existantes sont limitées pour l'interaction avec des EV affichés au moyen d'IVC.

3.1 Les IVC

3.1.1 Une visualisation collective

La visualisation d'un EV se fait à travers une interface de perception. La plus simple et la plus répandue de ces interfaces est l'écran d'ordinateur. D'autres interfaces cherchent à immerger les utilisateurs dans les EV qu'ils sont en train de visualiser. C'est le cas notamment des visiocasques pour lesquels les images affichées sont calculées en fonction de la position de la tête des utilisateurs. Les écrans, comme les visocasques, sont destinés à une utilisation individuelle.

La nécessité de travailler à plusieurs sur des projets communs a amené à la création de nouvelles interfaces. Les équipements individuels ont été interconnectés pour permettre à plusieurs utilisateurs distants de se retrouver dans un même EV : c'est le cas des environnements virtuels collaboratifs (eg. [NBB⁺99]). D'un autre côté, des systèmes à base de projection sur de grands écrans ont été développés pour permettre à plusieurs utilisateurs, localisés en un lieu unique, d'être immergés dans un même EV : c'est ce que nous avons appelé les IVC.

Un exemple d'IVC est la CAVE proposée par Cruz-Neira [CNSD93]. Le principe d'une CAVE est de permettre une immersion totale du regard, en affichant les EV sur des écrans qui entourent les utilisateurs (voir figure 7). Ce principe a été décliné, et a conduit à des systèmes qui offrent une immersion partielle du regard. C'est le cas notamment des plans de travail immersifs comme le Holobench [Hol], ou le *VR Table* [AFB02] illustré en figure 8. Le VR Table est développé au centre de réalité virtuelle de Barcelone [cvr]. Cette interface

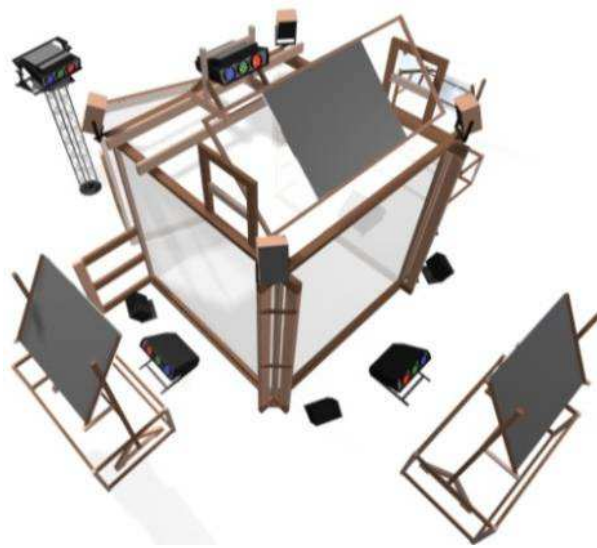


Figure 7: Principe de la CAVE



Figure 8: Le VR Table

de perception à bas prix est composée de deux PC et de deux vidéoprojecteurs standards pour une visualisation stéréoscopique d'EV sur grand écran. Les CAVES, comme les plans de travail immersifs, permettent à un petit groupe d'utilisateurs (moins de 5) de visualiser un même EV en un instant donné. Ces interfaces de perception sont généralement couplées avec un système de capture de position de la tête d'un des utilisateurs pour l'affichage des EV. Par conséquent, ces interfaces sont généralement utilisés dans un contexte individuel.

D'autres systèmes, à base de grands écrans, ont été développés pour permettre à un grand nombre d'utilisateurs (plus de 5) d'être immergés dans un même EV [HdlRG03]. Dans la suite de ce document, nous nous intéressons plus particulièrement à ce type d'interfaces de perception.

3.1.2 Technologie des IVC

Les IVC sont constitués d'une grande surface de projection et d'un ensemble de vidéo-projecteurs. Ils permettent l'affichage d'images issues de calculateurs graphiques. Les configurations matérielles des IVC peuvent aller d'un simple PC affichant des images sur un mur blanc au moyen d'un vidéoprojecteur portatif, jusqu'à des configurations intégrant plusieurs vidéoprojecteurs de haute résolution, pour une visualisation stéréoscopique d'images affichées sur des écrans courbes de grandes dimensions.

Surfaces de projection

Les IVC utilisent la projection directe (projecteurs devant l'écran) ou la rétroprojection (projecteurs derrière l'écran). Dans le cas de la projection directe, les surfaces de projection des IVC doivent être réfléchissantes pour une restitution correcte des images affichées. Ces surfaces de projection peuvent être hémicylindriques ou hémisphériques pour améliorer l'immersion du regard des observateurs.

Dans le cas de la rétroprojection, les surfaces de projection sont semi-transparentes. L'intérêt de la rétroprojection est de permettre aux utilisateurs de s'approcher des écrans sans occulter les images affichées. Par contre, l'inconvénient d'une telle approche est que les systèmes de rétroprojection nécessitent de la place pour leur installation. De plus, l'affichage à travers une surface semitransparente dégrade la qualité de l'image, notamment au niveau de la luminosité.

Vidéoprojecteurs

Il existe principalement trois technologies de projecteurs : CRT, LCD et DLP.

Les projecteurs CRT, ou projecteurs tritubes, offrent plusieurs avantages. Leurs résolutions importantes (jusqu'à 3200x2500 pixels en monoscopique) associées au mécanisme de balayage permettent une bonne qualité d'image. Les contrastes sont importants (les noirs sont vraiment noirs). Leurs taux de rafraîchissement élevés permettent une restitution stéréoscopique active. Finalement, ils peuvent être configurés avec une correction géométrique lors de la projection sur des surfaces courbes. En contre partie, les projecteurs CRT sont chers, ont une puissance lumineuse limitée (250 à 450 lumens) et leur instabilité matérielle nécessite une maintenance fréquente.

Les projecteurs LCD ont un prix généralement moins élevé que les projecteurs CRT. Ils offrent une puissance lumineuse plus importante. Par contre, la qualité de rendu des images est moins bonne. La résolution des LCD est limitée à 1280 par 1024, les contrastes sont moins bons, et les pixels sont généralement visibles à l'écran. De plus, les taux de rafraîchissement des projecteurs LCD ne permettent pas l'utilisation de la stéréocopie active.

Plus récemment, les projecteurs DLP sont apparus sur le marché. Ils utilisent des micro-miroirs rotatifs qui permettent de réfléchir des quantités de lumière souhaitées. Leur qualité de rendu se situe entre les projecteurs LCD et les projecteurs DLP.



Figure 9: Le RC3300W de SGI

Afin de permettre une fusion des images provenant de différents vidéoprojecteurs lors d'un affichage sur une grande surface de visualisation, la technique de "edge blending" est souvent utilisée. Cette technique consiste à superposer au pixel près les deux images dans la zone de fusion (recouvrement), et à diminuer progressivement la puissance lumineuse de chaque image dans cette zone, pour que la séparation entre les deux sources ne soit pas visible.

Calculateurs graphiques

SGI propose des calculateurs graphiques de grandes capacités à travers la série des ONYXs. Les ONYXs intègrent différentes briques matérielles et logicielles pour le rendu temps-réel de scènes complexes à travers la génération d'images de grandes résolutions. Alors que les ONYXs ont longtemps été incontournables pour la gestion d'EV affichés au moyen d'IVC, elles sont aujourd'hui concurrencées par des technologies moins onéreuses.

Les capacités des PCs standards actuels, et en particulier des cartes graphiques intégrées, permettent la gestion d'EV de plus en plus complexes. L'interconnexion de ces PCs au travers de "grappes de PCs" permet d'obtenir des performances comparables aux ONYXs, avec des coûts d'investissements moindres. L'utilisation de bibliothèques de rendu distribué (eg. NetJuggler [ARZ03] et Chromium [Chr]) permet un développement aisé des applications sur des grappes de PCs. On peut penser que les grappes de PCs, et même les PCs individuels, vont progressivement remplacer les ONYXs pour l'affichage d'EV au moyen d'IVC.

Solutions intégrées

Certains constructeurs proposent des IVC livrées clé en main. Les configurations de ces IVC sont variables. Par exemple, le *Reality Center 3300W* de SGI illustré en figure 9, utilise 3 video projecteurs pour l'affichage par rétroprojection des EV sur un écran plat. D'autres configurations utilisent des écrans hémicylindriques, comme c'est le cas avec Hémicyclia (figure 10), la salle de projection immersive de l'Université Bordeaux 1. L'affichage sur surfaces courbes permet une meilleure immersion du regard.

Elumens utilise des lentilles grand angle pour l'affichage sur une surface hémisphérique. La figure 11 illustre ce type d'IVC. Spitz propose des théâtres immersifs grand format pour des applications grand public. C'est le cas notamment du système ElectricSky, illustré en figure 12.



Figure 10: Hemicyclia

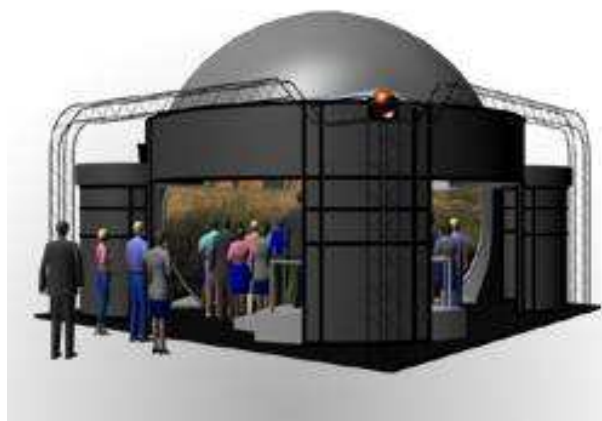


Figure 11: Le V5 d'Elumens

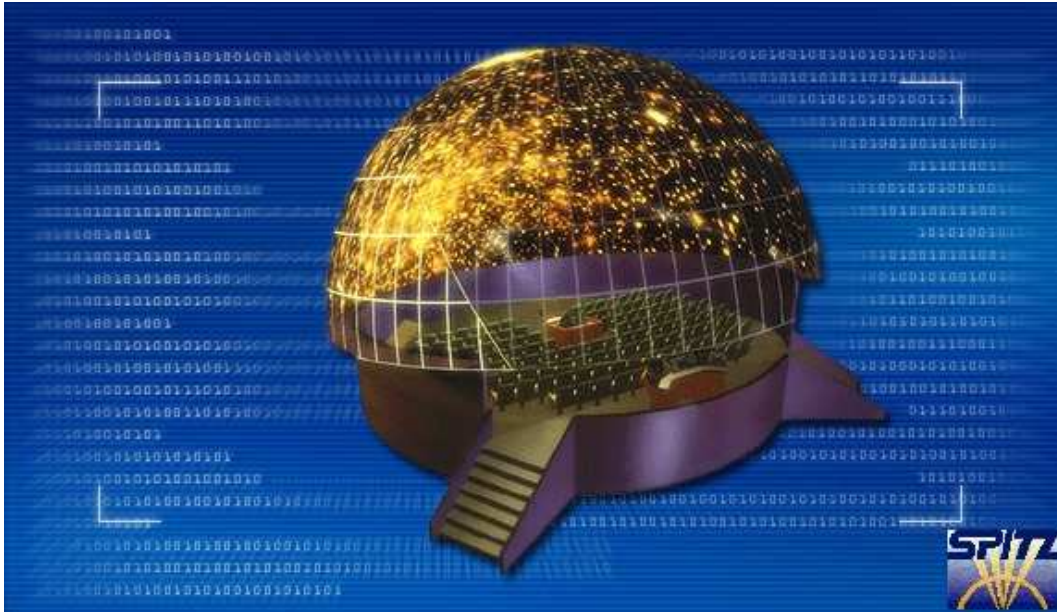


Figure 12: ElectricSky de Spitz

3.1.3 Utilisation des IVC

Les IVC sont des nouvelles interfaces de perception. Elles représentent une alternative aux visiocasques pour l'immersion d'un utilisateur dans un EV. En effet, Patrick et al. [PCS⁺00] ont montré qu'il n'existait pas de différences entre les visiocasques et les grands écrans lorsqu'un utilisateur cherchait à se construire une carte cognitive d'un EV.

Au-delà de leur aspect immersif, les IVC offrent une nouvelle dimension aux interfaces de perception. Elles permettent à plusieurs utilisateurs de visualiser une même image en un instant donné. Par conséquent, les IVC utilisées pour l'affichage d'EV sont des outils formidables pour le travail de groupe.

Pourtant, de tels systèmes sont souvent sous-utilisés, comme l'ont remarqué Buxton et al. dans leur étude sur l'utilisation des grands écrans dans l'industrie automobile [BFBK00]. Pour eux, cette sous-utilisation est liée au fait que les interfaces d'action traditionnelles ne sont pas adaptées à ces nouvelles interfaces de perception.

Nous pensons que tant qu'il n'existera pas d'interfaces d'action adaptées à l'interaction avec des EV affichées au moyen d'IVC, les applications 3D temps-réel utilisées collectivement face à un grand écran resteront limitées. Pour permettre le développement de ces applications prometteuses, nous nous sommes intéressés aux relations qu'il existait entre les IVC et l'interaction avec des EV.

3.2 Caractéristiques des IVC pour l'interaction avec des EV

Nous avons cherché à identifier les caractéristiques des IVC par rapport aux autres interfaces de visualisation, pour l'interaction avec des EV. Nous proposons de mettre en avant quatre grandes caractéristiques :

- Une surface de visualisation de grande taille
- Un espace de travail de grande taille
- Une utilisation collective
- Un point de vue caméra partagé

L'étude de ces caractéristiques va nous permettre de critiquer les interfaces d'actions existantes utilisées dans un contexte d'IVC. Elle nous servira ensuite de base pour le développement d'une nouvelle interface.

3.2.1 Surface de visualisation de grande taille

La première caractéristique intrinsèque des IVC concerne les dimensions de la surface de visualisation. Les dimensions des écrans des IVC permettent une visualisation globale et une visualisation locale en même temps. Cela implique, au niveau de l'interaction, que les utilisateurs doivent pouvoir effectuer de grands déplacements dans l'EV avec rapidité, tout en gardant la possibilité d'effectuer de petits déplacements avec précision. Par exemple, dans l'industrie pétrolière, où les IVC sont utilisées pour le choix des sites de forages, les ingénieurs doivent pouvoir sélectionner des terrains favorables en balayant les couches géologiques d'un bout à l'autre de l'écran. Dans une zone donnée, localisée en une partie de l'écran, ils doivent être capables de sélectionner précisément un point de forage. Par conséquent, pour profiter de la surface de visualisation des IVC, les ingénieurs doivent avoir à leur disposition des interfaces d'action performantes pour un travail au niveau global et pour un travail au niveau local.

La grande majorité des applications de bureau basées sur des EV utilisent des interfaces graphiques 2D dont les composants (menus, boutons, ascenseurs) sont situés en périphérie de l'écran, pour le contrôle du système. Avec des IVC, ces interfaces graphiques deviennent inefficaces, dès lors que les utilisateurs vont devoir effectuer des aller-retours entre l'EV et la périphérie de l'écran [BFKB99]. Le fait de focaliser leur attention successivement sur l'EV qu'ils visualisent face à eux, puis sur les composants d'interfaces qu'ils vont chercher sur leurs côtés, va impliquer une surcharge cognitive, et donc, une perte de performance. Une application destinée à être visualisée avec des IVC devra, autant que possible, éviter les interfaces graphique 2D destinées aux écrans standards. De nouvelles interfaces pour le contrôle de l'application devront être imaginées.

3.2.2 Espace de travail de grande taille

La surface d'évolution située devant les écrans des IVC permet aux utilisateurs de disposer d'un espace de travail de grande taille. Cet espace va permettre aux utilisateurs de se déplacer pour aller observer une zone particulière d'un EV par exemple. De même, on peut imaginer qu'une partie de cet espace soit occupé par une table de travail qui va permettre aux utilisateurs d'utiliser des documents papier classiques. Par conséquent, les interfaces d'action

destinées aux IVC ne doivent pas restreindre les utilisateurs dans leurs déplacements. Lorsque la visualisation des EV se fait à travers des interfaces de perception individuelle comme des moniteurs de bureau ou des visiocasques par exemple, alors les déplacements des utilisateurs sont quasiment inexistant. Dans ce cas, les interfaces d'action dédiées peuvent avoir un rayon de fonctionnement très restreint. Par contre, avec des IVC, les utilisateurs doivent pouvoir se déplacer sans être restreints par les interfaces d'actions qu'ils utilisent. Pour cela, deux alternatives sont possibles.

La première est d'utiliser des interfaces d'action dont l'acquisition est aisée. Ainsi, les utilisateurs peuvent interagir avec l'EV au moyen de telles interfaces, puis laisser ces dernières pour se déplacer dans l'espace et faire autre chose, puis revenir interagir sans qu'il y ait de phase d' "appareillage". Les interfaces d'actions qui s'utilisent en position assise devront être évitées si l'on veut laisser aux utilisateurs la possibilité de se déplacer dans l'espace de travail. De plus, une interface destinée à être successivement utilisée puis laissée de côté aura intérêt à être persistante, c'est à dire que son état physique ne devrait pas être modifié lorsqu'elle est relâchée. Cette caractéristique permet de retrouver l'interface dans l'état dans lequel on l'avait laissée, et ainsi de reprendre des tâches d'interaction sans qu'il y ait eu de modification dans l'EV.

La deuxième alternative consiste à utiliser des interfaces d'action mobiles, pour que les utilisateurs soient capables d'interagir quelle que soit leur position dans l'espace de travail. Dans ce cas, la principale difficulté réside dans la transmission de données. En effet, sur une distance de quelques mètres, les interfaces filaires deviennent encombrantes et sont donc à proscrire pour une utilisation avec des IVC. Des technologies "sans-fil" représentent une alternative. Cependant ces technologies connaissent certaines limitations comme la portée de transmission limitée, la sensibilité aux interférences et la production de sources parasites, les problèmes d'occlusions, ou encore le prix plus élevé que les systèmes filaires.

3.2.3 Utilisation collective

Les IVC permettent une visualisation collective d'un EV et se démarquent en cela des interfaces de visualisation individuelles. Malgré cet atout, généralement, un seul utilisateur a la possibilité d'interagir avec l'EV, les autres participants se cantonnant à un rôle de spectateurs passifs. Pour permettre une utilisation réellement collective des IVC, chaque participant devrait pouvoir interagir. Pour cela, il faut avoir une (ou des) interface d'action qui soit partageable par tous, ou encore équiper chacun avec une interface d'action individuelle. Si l'on choisit la première solution, l'acquisition de l'interface doit être aisée pour faciliter l'échange entre les différents utilisateurs. Dans ce cas, la persistance de l'interface est souhaitée. Si l'on choisit d'équiper chacun avec une interface individuelle, alors cette dernière doit répondre aux critères de mobilité décrits précédemment.

Chacune de ces deux solutions présente des avantages et des inconvénients. L'avantage de multiplier les interfaces d'action individuelles est de permettre à chacun d'interagir à tout instant. Par contre, cette approche présente des inconvénients comme par exemple :

- la gestion des conflits entre les différents utilisateurs. Par exemple, que faire quand deux personnes veulent bouger un objet en même temps ?

- la difficulté de faire fonctionner plusieurs interfaces d'action en même temps : problèmes d'interférence, de gestion temps réel, etc
- l'encombrement des interfaces d'actions. En effet, chacun des utilisateurs est équipé en permanence avec sa propre interface, même s'il n'interagit pas en permanence. Dans ce cas, les interfaces d'actions doivent être très légères.

Une interface d'action partagée évite ces inconvénients. En contre partie, les utilisateurs doivent se déplacer pour venir interagir chacun leur tour.

3.2.4 Point de vue caméra partagé

La visualisation d'un EV au moyen d'interfaces de perception se fait à travers des images qui sont calculées à partir du point de vue de la caméra. Lorsque l'on cherche à immerger un utilisateur dans un EV, il est souhaitable que le point de vue de la caméra soit en correspondance avec la position de l'observateur. Cela permet de renforcer le sentiment d'immersion.

Avec les interfaces visuelles individuelles, un système de capture de la position de la tête peut être utilisé. Dans ce cas, les images affichées sont calculées à partir de la position de la tête de l'observateur. Par contre, dès lors que plusieurs participants observent un même écran, il n'est plus possible de proposer une image différente pour chacun des utilisateurs. Par conséquent, dans un contexte IVC, les différents participants visualisent un EV à travers un point de vue caméra unique. Ce point de vue peut être calculé en fonction de la position de la tête d'un des participants. Cependant, cette solution conduit à une situation qui n'est confortable que pour un participant et désagréable pour les autres. On peut donc dire que la capture de la position de la tête n'est pas adapté aux IVC, dès lors que l'on cherche à immerger plusieurs personnes dans un EV. Les changements de point de vue de la caméra devront donc être effectués au moyen d'autres interfaces d'action. Ces interfaces devront permettre d'effectuer facilement des mouvements de caméra rapides et précis.

Par ailleurs, les techniques d'interaction utilisées avec les IVC devront être indépendantes du point de vue puisque la position à partir de laquelle les utilisateurs interagissent peut être très différente de la position à partir de laquelle la scène est affichée. Par exemple, la technique qui consiste à envoyer un rayon virtuel dans la scène pour sélectionner un objet (figure 13(a)) ne peut fonctionner que si l'utilisateur se situe à proximité du point à partir duquel la scène est affichée : cette technique est donc dépendante du point de vue. Par contre, la technique qui consiste à sélectionner un objet en pointant directement sa projection sur l'écran est indépendante du point de vue (figure 13(b)), et peut donc être réalisée à partir de n'importe où, face à un grand écran.

3.2.5 Caractéristiques complémentaires

Nous venons de décrire quatre caractéristiques qui distinguent les IVC des autres interfaces de perception visuelle. Nous rappelons maintenant deux caractéristiques complémentaires qui ne sont pas propres aux IVC, mais qui devront être prises en compte pour le développement d'interfaces d'action.

La première concerne la visualisation de l'environnement réel en même temps que la visualisation de l'EV. Cette caractéristique implique que les problèmes d'occlusion devront être

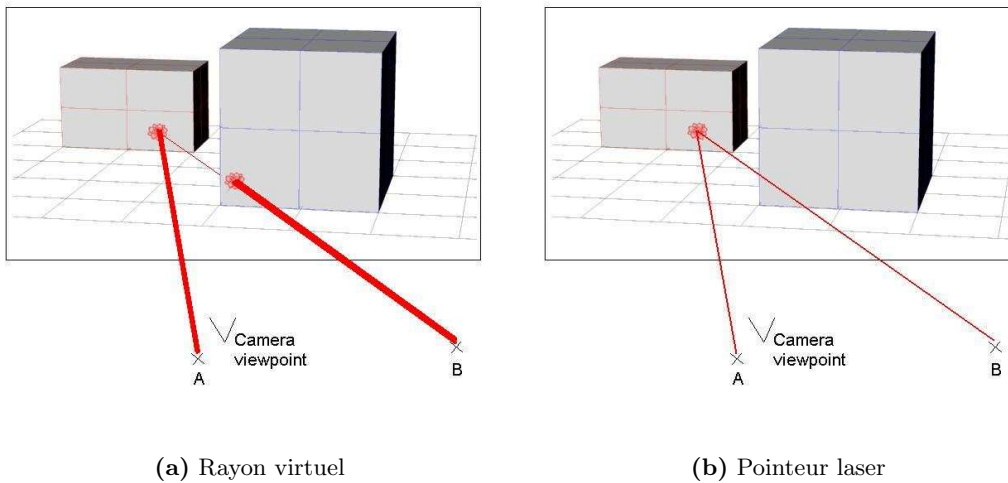


Figure 13: Influence du point de vue sur les techniques d'interaction utilisées. La sélection d'un objet à partir d'un rayon virtuel (a) n'est possible que si le point d'interaction est proche du point de vue (cas A). La sélection d'un objet à travers sa projection sur l'écran (b) n'est pas dépendante de la position du point de vue.

pris en compte au moment de l'interaction, ce qui n'était pas le cas avec les visiocasques. Par ailleurs, la superposition de l'environnement réel et de l'EV peut amener à des situations troublantes, notamment lorsque l'utilisateur visualise des mains virtuelles en plus de ses mains réelles, comme Van de Pol et al. l'ont noté dans leur étude sur l'interaction avec un plan de travail virtuel [vdPHP99].

La deuxième caractéristique concerne la variété des applications qui pourront être visualisées à l'aide des IVC. Un utilisateur équipé d'un visiocasque a généralement une vue egocentrée d'un EV. Les plans de travail virtuels sont généralement utilisés pour manipuler directement des objets en vision exocentrée. L'utilisation des IVC est variable. Ils peuvent être utilisés pour des applications allant de la manipulation d'objets proches, situés dans un EV de taille réduite, à la navigation dans un EV de grande dimension. La visualisation stéréoscopique peut être ou non être utilisée. Par conséquent, une interface d'action non spécifique destinée aux IVC, doit pouvoir opérer à des distances virtuelles variables, pour différentes tâches d'interaction.

3.2.6 Recommandations pour l'interaction avec des EV affichés au moyen d'IVC

Après avoir étudié les caractéristiques des IVC, nous proposons maintenant une liste de recommandations pour l'interaction avec des EV.

- Les interfaces d'action doivent être performantes pour de grands déplacements comme pour des déplacements fins.

- Les interfaces graphiques 2D en périphérie de l'écran sont à éviter.
- Les interfaces d'action fixes doivent être acquises facilement et si possible être persistantes.
- Les interfaces d'action mobiles ne doivent pas être contraignantes (sans fils, légères), et leur rayon de fonctionnement doit couvrir tout l'espace de travail.
- Les techniques d'interaction doivent être indépendantes du point de vue.
- La visualisation de l'environnement réel doit être prise en compte.
- Les interfaces d'action généraliste doivent être polyvalentes : tâches d'interaction différentes, espaces virtuels de tailles variables, visualisation exocentrée ou endocentrée, visualisation stéréoscopique ou non.

A partir de ces recommandations et des critères pour l'interaction décrits dans le chapitre précédent, nous allons maintenant analyser les interfaces d'action existantes pour une utilisation avec des EV affichés au moyen de IVC.

3.3 Les interfaces d'action existantes face aux IVC

Les interfaces d'actions pour l'interaction avec des EV affichés au moyen d'IVC n'ont généralement pas été développées spécifiquement pour ce type d'interface de perception. Par conséquent, elles présentent souvent des limitations. Des solutions alternatives ont été proposées, mais nous verrons que ces solutions ne sont pas toujours performantes pour l'interaction avec des EV.

3.3.1 La souris

La souris reste probablement l'interface la plus souvent utilisée pour l'interaction avec des EV affichés au moyen d'IVC. La grande majorité des applications fonctionnent par défaut au moyen de cette interface qui est généralement fournie avec tout système informatique. Pourtant, la souris présente de nombreux inconvénients pour l'interaction avec des IVC, parmi lesquels :

- le mode de fonctionnement nécessitant une surface plane (table ou bureau)
- la difficulté d'effectuer de grands déplacements
- le manque de ddls pour l'interaction 3D
- l'affectation du sentiment d'immersion

La souris a besoin d'une surface plane pour fonctionner. Du mobilier doit donc être installé dans l'espace de travail. Afin de favoriser le partage de l'interface, ce mobilier doit être peu encombrant, et conçu pour une utilisation debout. Pour éviter un mobilier fixe dans l'espace de travail, la souris peut être remplacée par une interface qui se tient dans la main, comme

un trackball ou une télécommande à base de Joystick (eg. RemotePoint [Rem]). Pour ce type d'interface, il faudra prendre en compte les critères de mobilité décrits précédemment.

Le mode de fonctionnement de la souris (et du trackball) rend les grands déplacements peu efficaces. En effet, pour déplacer un curseur d'un bout à l'autre de l'écran, il est nécessaire de faire rouler la souris sur une grande distance, ou faire des "allers-retours", ce qui va prendre un certain temps d'exécution. Si l'on cherche à réduire ce temps, alors on peut augmenter le rapport entre la distance parcourue sur l'écran et la distance parcourue par la souris, mais dans ce cas, la précision pour les petits déplacements sera moins bonne. Pour permettre de grands déplacements rapides ainsi que de petits déplacements précis, une technique consiste à corrélérer la distance parcourue sur l'écran à la vitesse de déplacement de la souris. Cette technique, couramment utilisée avec des écrans de taille réduite, ne résout pas en pratique le problème des "allers-retours" nécessaires sur des écrans de grande dimension. De plus, le mode de fonctionnement indirect de la souris pose le problème de recherche du curseur sur des écrans de grande dimension. En effet, lors de la prise en main de l'interface, il n'est pas rare que l'utilisateur passe un certain temps à chercher le curseur sur l'écran, avant de pouvoir interagir avec le système.

3.3.2 Les écrans interactifs

Afin de permettre une interaction plus directe avec des IVC, une alternative consiste à utiliser des écrans interactifs. Par exemple, LiveBoard [EBG⁺92], de la société Xerox, est un écran sur lequel il est possible de détecter la position d'un stylet. Ainsi, les utilisateurs peuvent interagir avec le système en sélectionnant directement des zones de l'écran. Techniquement, LiveBoard utilise de la rétro-projection. Le stylet est équipé d'une diode électroluminescente (LED) dont la position est récupérée par un module de détection situé derrière l'écran. Le système HoloWall [MR97] a été développé par Sony pour éviter l'utilisation d'un stylet spécialisé. Ce système permet de détecter directement la position de mains, ou d'objets, sur l'écran au moyen de caméras infrarouges. La société Smart Technologies [Sma] utilise la capture de pression pour récupérer la position d'un doigt sur un écran. Smart Technologies propose des solutions pour de la projection directe, de la retro-projection, ou l'utilisation d'écrans plasma. La société Mimio [Mim] utilise une technologie à base d'ultrasons pour récupérer la position d'un stylo sur n'importe quelle surface de projection, notamment sur les tableaux blancs classiques.

Toutes ces technologies permettent d'interagir avec le système en manipulant directement les objets à l'endroit où ils sont affichés sur l'écran. Ces systèmes sont généralement utilisés pour manipuler des information d'origine diverses (eg. graphiques, présentation PowerPoint) lors de réunion de travail [PMMH93][GSW01]. Des métaphores d'interaction spécialisées ont été proposées pour ces systèmes comme par exemple le FlowMenu de Guimbretière et Winograd [GSW01]. La principale limitation des écrans interactifs est leur taille réduite. Au delà des limitations technologiques, ces tailles réduites sont nécessaires pour que les utilisateurs puissent accéder aux différentes zones de l'écran. Par conséquent, les écrans interactifs ne peuvent être utilisés simultanément, que par un nombre réduit d'utilisateurs situés à proximité de la surface de projection.

3.3.3 Les pointeurs lasers

Afin de permettre aux utilisateurs de déplacer un curseur sur un écran de grande dimension, plusieurs auteurs proposent d’utiliser des pointeurs lasers (eg [JN01][Pec01]). Les pointeurs lasers sont des interfaces d’action peu encombrantes qui permettent une interaction directe à distance. Le principe général consiste à filmer la surface de projection (ou de rétro projection) pour détecter la position du spot lumineux issu du pointeur laser. Les caméras peuvent être placées devant ou derrière l’écran. Pour des écrans de grandes dimensions, plusieurs caméras sont nécessaires [DC02][Wis01]. De la Rivière présente l’utilisation de pointeurs lasers dans Hémicyclia, la salle de projection immersive de l’Université Bordeaux 1 [dlR01].

Différentes expérimentations ont été menées autour des pointeurs lasers. Par exemple, Knudsen et al. [KEPP01] évaluent les performances des utilisateurs pour une tâche de sélection face à un écran de grande dimension. Ils montrent que les pointeurs lasers respectent la loi de Fitts, qu’ils sont généralement plus performants que les souris (sauf pour les petits objets), et que les performances des utilisateurs diminuent avec la distance.

Les interfaces basées sur des pointeurs lasers posent plusieurs difficultés. Tout d’abord le fait de tenir le pointeur laser en l’air, sans support pour la main, engendre des tremblements. Plus l’utilisateur se situe loin de l’écran, et plus ces tremblements ont une répercussion sur les mouvements du curseur [Pec01]. Afin de limiter ce problème, des filtres logiciels sont généralement utilisés [MBN⁺02]. Ces filtres impliquent un temps de latence entre les mouvements de l’utilisateur et les mouvements filtrés du curseur sur l’écran. Les petits mouvements précis sont donc difficiles à réaliser avec des pointeurs lasers. Une deuxième difficulté est la génération d’un événement de click de bouton. Les solutions proposées sont généralement la persistance du spot lumineux en un endroit donné, la détection de séquences rapides allumé/éteint/allumé, ou la reconnaissance de gestes. Toutes ces techniques nécessitent un temps de réalisation non négligeable de la part de l’utilisateur, ce qui affecte l’efficacité de ce dernier.

L’utilisation de pointeurs lasers peut poser des difficultés lors d’une utilisation avec de nombreux participants. En effet, il est nécessaire que l’espace entre l’utilisateur et l’écran soit totalement vide pour éviter les problèmes d’occlusions. Une alternative peut être l’utilisation du Gyromouse [Gyr], dont le mode de fonctionnement, basé sur la technologie GyroPoint, consiste à utiliser des gyroscopes pour détecter les mouvements angulaires de l’interface. Une autre approche est l’utilisation capteur de position comme dispositif de pointage sur l’écran [AR01].

Finalement, la dernière limitation, propre à l’interaction avec des EV, concerne la dégradation du sentiment d’immersion. En effet, les IVC favorisent l’immersion des utilisateurs dans les EV qu’ils sont en train de visualiser. L’introduction d’un curseur se déplaçant sur l’écran 2D va affecter ce sentiment d’immersion ; l’écran sera une référence pour les utilisateurs, alors qu’il devrait être oublié. Cela est particulièrement vrai dès lors qu’une visualisation stéréoscopique est utilisée. Les interfaces 2D décrites jusqu’à maintenant, sont généralement inutilisables avec une vision stéréoscopique.

3.3.4 Les ordinateurs *tenus-dans-la-main*

Les ordinateurs *tenus-dans-la-main* peuvent être utilisés comme interfaces d'action pour l'interaction avec des EV affichés au moyen d'IVC. La visualisation stéréoscopique de l'EV n'est pas un facteur limitant pour ce type d'interface.

Watsen, Darken, et Capps utilisent le 3Com PalmPilot pour interagir dans une CAVE [WDC99]. L'utilisation d'interfaces graphiques 2D classiques affichées sur le PDA leur permet de contrôler l'application au moyen d'un stylet. Selon la même philosophie, Hill et Cruz-Neira ont développé le système JAIVE qui correspond à une collection d'interface 2D utilisables sur des *tablets PC* capables de faire tourner la machine virtuelle Java [HCN00]. Le système Tweek [HBCN02] a été développé pour faciliter la communication avec les applications de réalité virtuelle au travers de l'outil de développement VR Juggler [BJH⁺01]. Enfin, Benini et al. utilisent une approche PDA pour interagir dans une application de patrimoine virtuel [BBC⁺02]. Au delà des possibilités pour l'interaction, ils utilisent les PDA pour visualiser des photos, ou des plans en plus de l'EV.

Les ordinateurs *tenus-dans-la-main* peuvent être efficaces pour certaines tâches d'interaction dans des EV affichés au moyen d'interfaces de perception immersives, notamment pour les tâches d'interaction 2D. En plus d'interfaces d'action, ils peuvent être utilisés comme outils de collaboration dans le cadre de CSCW, en particulier pour le stockage et l'accès à des informations personnelles [MSG98].

Nous venons de voir un ensemble d'interfaces 2D pour l'interaction avec des EV affichés au moyen d'IVC. La principale limitation commune à toutes ces interfaces est le nombre limité de degrés de libertés rendant la réalisation de nombreuses tâches d'interaction 3D difficiles à réaliser. Par exemple, aucune de ces interfaces ne permet le suivi fluide d'une trajectoire 3D. Nous allons maintenant nous intéresser à l'utilisation d'interfaces 3D pour une utilisation avec des IVC.

3.3.5 Les interfaces d'action 3D isotoniques et les gants

Les interfaces d'action 3D isotoniques (capteurs de position, souris volantes, tablettes-et-stylets), ainsi que les gants dont la position et l'orientation dans l'espace sont généralement capturées, sont largement utilisés pour l'interaction avec des EV affichés à travers des interfaces de perception individuelle. Ces interfaces d'action contribuent à l'immersion de l'utilisateur. Lorsque la vue sur l'EV est calculée à partir de la position de la tête de l'utilisateur, alors un grand nombre de techniques d'interaction peut être utilisé. Par exemple, nous avons vu que l'affichage d'éléments virtuels sur une tablette réelle transparente permettait d'utiliser des techniques d'interaction 2D dans un EV affiché à partir d'une grande surface de projection [EBSC99]. Cette mise en correspondance n'est possible que si l'affichage de la tablette virtuelle est calculée à partir de la position de la tête de l'utilisateur. Lorsque les images affichées ne sont pas calculées à partir de la tête de l'utilisateur, comme c'est le cas avec les IVC, alors de nombreuses techniques d'interaction classiques destinées aux interfaces 3D isotoniques deviennent inefficaces, voire inutilisables.

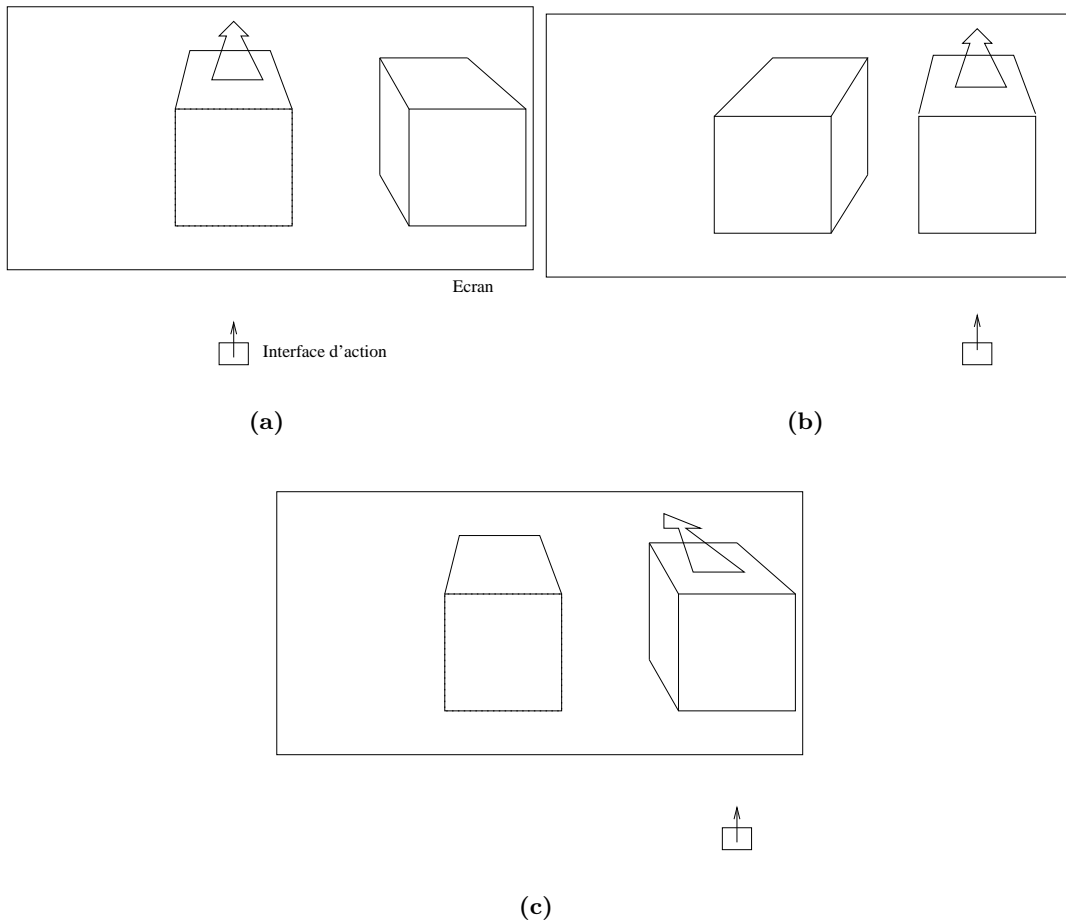


Figure 14: Translation d'un objet à partir d'une interface 3D isotonique. Lorsque l'image affichée est calculée en fonction de la position de l'observateur alors les mouvements de l'objet sont cohérents par rapport aux mouvements de l'interface (a et b). Par contre, dès que le point de vue de la caméra est indépendant de la position de l'observateur, alors les mouvements de l'objet ne correspondent plus aux mouvements de l'interface (c).

Pour se convaincre de l'influence du point de vue sur l'efficacité d'utilisation des interfaces 3D isotoniques (en projection perspective), considérons une technique d'interaction très courante qui consiste à attacher les mouvements d'un objet aux mouvements de l'interface d'action. Lorsque l'image affichée sur l'écran est en correspondance avec la position de l'observateur, alors les mouvements des objets dans l'espace virtuel sont cohérents avec les mouvements de l'interface dans l'espace réel (Figure 14(a) et 14(b)). Par contre, si l'image affichée sur l'écran ne correspond pas à la position de l'observateur, alors les mouvements des objets ne sont pas forcément en correspondance avec les mouvements de l'interface (figure 14(c)).

Le point de vue partagé des IVC limite l'intérêt d'utilisation des interfaces 3D isotoniques pour l'interaction avec des EV. Par ailleurs, de telles interfaces d'actions présentent un certain nombre d'inconvénients.

Tout d'abord, elles sont généralement utilisées en mode contrôle de position, et nous avons vu que ce mode n'était pas adapté à la taille des écrans des IVC. En effet, attacher les mouvements d'un objet aux mouvements d'une interface d'action 3D isotonique implique que les utilisateurs vont devoir effectuer de grands déplacements pour déplacer un objet d'un bout à l'autre de l'écran. Une alternative pour déplacer un objet est d'utiliser une technique d'interaction à distance, comme le ray-casting par exemple. Cependant, nous avons vu qu'une telle approche était problématique car le point à partir duquel l'utilisateur interagit peut être très différent du point à partir duquel la scène est affichée.

Concernant l'aspect collectif, les interfaces d'action 3D isotoniques peuvent difficilement être partagées entre les différents utilisateurs. En effet, il n'est pas très pratique d'échanger de telles interfaces. De plus, leur aspect non persistant risque d'impliquer des modifications non souhaitées dans l'EV lors du changement d'utilisateur. Si l'on choisit d'équiper chacun des utilisateurs avec sa propre interface d'action, alors on risque d'être confronté aux problèmes décrits précédemment ; difficultés de gérer plusieurs occurrences en même temps, encombrement lorsqu'on ne se sert pas de l'interface, interférences ...

Grossman et al. ont utilisé des capteurs de position pour de la modélisation avec une IVC [GBK⁺01]. Dans leur approche, seul 2 ddls des capteurs sont utilisés pour déplacer des curseurs sur l'écran. L'utilisation d'un écran de grande dimension les a amené à développer des techniques d'interaction particulières, comme une technique de création de courbes ou l'utilisation de plan de construction. Grossman et al. concluent en remarquant qu'une telle approche n'était possible que pour des écrans de taille réduite, et que de nouvelles interfaces devaient être inventées pour des écrans de plus grande dimension.

Bouguila, Ishii, et Sato s'intéressent au problème des interfaces haptiques face aux grands écrans. [BIS02]. Pour éviter les problèmes d'occlusion occasionnés par les structures classiques des systèmes à retour de forces, ils proposent une solution à base de fils, extension du SPIDAR. L'inconvénient de leur approche est que leur système n'est prévu que pour une utilisation individuelle.

3.3.6 Les interfaces d'action 3D isométriques

Les interfaces d'action 3D isométriques présentent certains avantages pour une utilisation avec des IVC. En effet, leur mode de fonctionnement basé sur le contrôle de la vitesse, permet une utilisation au niveau global comme au niveau local. Les techniques d'interaction utilisées ne sont pas dépendantes du point de vue. Les interfaces d'action 3D isométriques peuvent être partagées par différents utilisateurs car leur acquisition est aisée et leur position persistante.

Cependant, ces interfaces sont généralement prévues pour une utilisation assise devant un bureau. Dans ces conditions, les interfaces 3D isométriques sont utilisées en complément des interfaces standards : clavier et souris. La combinaison de ces trois interfaces d'action permet de travailler avec des applications concrètes. La sélection des objets se fait au moyen de la souris, le clavier contribue au contrôle du système, et l'interface 3D isométrique sert à manipuler les objets 3D. Une telle configuration nécessite l'installation d'un bureau face à l'interface de visualisation. Cette approche va à l'encontre des critères de mobilité précédemment décrits pour une utilisation avec des IVC. L'utilisation des interfaces 3D isométriques

pour l'interaction avec des EV affichés au moyen d'IVC reste marginale. Nous pensons que la principale raison pour laquelle ces interfaces ne sont pas utilisées repose sur leur difficulté d'apprentissage.

3.3.7 Interfaces d'actions à base de capture vidéo

Les interfaces d'action à base de capture vidéo sont des interfaces qui fonctionnent à partir de l'analyse de flux vidéos provenant de caméras filmant l'espace de travail [FBK⁺00]. Ces interfaces ont pour principal avantage de permettre aux utilisateurs d'interagir avec le système, sans qu'ils aient à s'équiper auparavant avec des interfaces physiques. Les interfaces à base de capture vidéo permettent aux utilisateurs de se déplacer sans être contraints par le moindre fil. Ce type d'interface est donc intéressant pour une utilisation avec des IVC.

Certains auteurs utilisent la capture vidéo pour la reconnaissance des poses des utilisateurs dans l'environnement [Dav98], ou pour extraire la position et l'orientation de la main de l'utilisateur [SSK01]. De la Rivière et Guitton, explorent une approche basée modèle pour la reconnaissance de postures de la main dans un contexte d'IVC [dlRG03]. Ces approches ont pour avantage de permettre aux utilisateurs d'interagir directement à travers des mouvements de leur corps, sans aucun outil extérieur. Cet avantage peut aussi être vu comme un inconvénient, à partir du moment où les utilisateurs n'ont aucun retour haptique sur ce qu'ils font.

D'autres auteurs utilisent des outils pour l'interaction face à des IVC. Par exemple, Cao et Balakrishnan proposent d'utiliser un bâton dont la position et l'orientation sont capturées, le VisionWand [CB]. De leur côté, Duval et al. utilisent des diodes pour l'interaction avec des EV, à travers la plateforme de simulation GASP [DRC⁺00].

Les interfaces à base de capture vidéo semblent être prometteuses pour une utilisation face aux IVC, les problèmes liés aux systèmes de captures classiques étant évités [dlRG03]. Cependant, cette approche présente quelques limitations pour l'interaction avec des EV, comme par exemple la fatigue qui peut survenir lors d'utilisations prolongées, ou la difficulté de réaliser facilement certaines tâches d'interaction 3D complexes.

3.4 Conclusion

Les IVC sont des interfaces de perception pour la visualisation d'EV. L'intérêt de ces interfaces pour les applications collectives engendre un nombre grandissant d'implantations au sein des entreprises. Il y a fort à parier que ce nombre d'implantations ne va cesser de croître dans les années à venir.

Les caractéristiques propres des IVC doivent être prises en compte pour l'interaction avec des EV. Les interfaces d'action classiques ne sont pas adaptées à de tels systèmes et les interfaces développées spécialement pour les IVC restent généralement limitées pour l'interaction avec des EV.

Nous sommes donc arrivés à la conclusion qu'il n'existait pas d'interface d'action permettant à des utilisateurs d'interagir facilement et efficacement avec des EV affichés au moyen d'IVC. En conséquence, nous avons développé une nouvelle interface : le CAT. Nous décrivons cette interface dans les chapitres suivants.

Chapitre 4

CAT : une nouvelle interface

Le CAT est une interface d'action qui a été développée pour permettre à plusieurs utilisateurs d'interagir facilement et efficacement avec des EV affichés au moyen d'IVC [HG02]. Dans ce chapitre, nous présentons le CAT, tant au niveau matériel qu'au niveau logiciel.

4.1 Approche

Nous avons présenté dans le chapitre 2 les pistes qui nous semblaient intéressantes à suivre pour le développement d'une interface destinée à l'interaction avec des EV. Dans le chapitre 3, nous nous sommes attachés aux caractéristiques que devait avoir une telle interface pour une utilisation dans le contexte particulier des IVC. A partir de ces éléments de réflexion, nous avons développé une nouvelle interface pour l'interaction avec des EV affichés au moyen d'IVC : le CAT. Nous présentons ici la démarche qui nous a permis d'aboutir à cette nouvelle interface.

Tout d'abord, nous avons vu que la réalisation de tâches d'interaction 3D dans des EV nécessitait le contrôle de 6 ddls. Par conséquent, nous nous sommes orientés vers une interface d'action à 6 ddls.

Comme nous l'avons déjà noté, nous pensons qu'une interface d'action destinée aux IVC doit être facilement partageable pour permettre des sessions de travail collectives. De plus, cette interface ne doit pas restreindre les utilisateurs dans leurs mouvements. Finalement, nous avons noté que la fatigue liée à l'utilisation prolongée d'une interface d'action pouvait être pénalisante. Pour ces raisons, nous avons voulu que notre interface soit autoportée.

Afin que les utilisateurs puissent déplacer des objets sur de grandes distances sans avoir à marcher d'un bout à l'autre des écrans des IVC, nous avons choisi d'associer une fonction de transfert d'ordre 1 aux translations. Les travaux de Zhai ont montré que le contrôle d'une fonction de transfert d'ordre 1 était plus efficace au moyen d'un mode de résistance isométrique qu'au moyen d'un mode de résistance isotonique [Zha95]. Par conséquent, nous avons choisi d'utiliser un mode de résistance isométrique pour le contrôle des translations.

Au niveau des rotations, une fonction de transfert d'ordre 1 est difficile à assimiler par les utilisateurs, car les rotations ne sont pas commutatives. Cette difficulté d'assimilation rend

les interfaces d'action isométriques difficiles à utiliser par les utilisateurs novices. A l'opposé, une fonction de transfert d'ordre 0, associée à un mode de résistance isotonique, permet un apprentissage plus rapide, comme nous le précisons un peu plus loin. Nous avons donc choisi, pour notre interface, de contrôler les rotations au travers d'un mode de résistance isotonique. Contrairement à l'espace des translations qui est infini, l'espace des rotations est cyclique. Par conséquent, l'utilisation d'un mode de résistance isotonique pour les rotations ne pose pas le problème d'un espace accessible réduit.

Nous avons noté que la dimension haptique était favorable aux interfaces pour l'interaction avec des EV. Nous avons donc souhaité que le contrôle des 6 ddl de notre interface se fasse au travers d'un plateau que les utilisateurs tiendraient dans leurs mains. Ainsi, associés à des métaphores adéquates, les stimuli haptiques offerts par la seule forme de ce plateau peuvent renforcer les stimuli visuels.

Finalement, nous avons vu que l'interaction 2D dans des EV permettait de réaliser efficacement des tâches d'interaction qui sont difficiles à réaliser au moyen de techniques d'interaction 3D. Nous avons donc cherché à rendre possible l'utilisation de technique d'interaction 2D.

Cette approche nous a conduit à un cahier des charges simple pour la réalisation physique de notre interface :

- Un plateau mobile peut tourner autour de son centre de gravité selon toutes les directions. L'orientation du plateau est récupérée (composante isotonique).
- Le plateau ne se déplace pas en translation. Les forces appliquées sur ce dernier sont récupérées (composante isométrique).
- Le plateau est autosupporté et ne bouge pas quand il est relâché.
- La position d'un stylet sur le plateau est récupérée.

La figure 15 illustre les 6 degrés de liberté récupérés au niveau du plateau.

Ce cahier des charges définit les caractéristiques physiques que devra avoir notre nouvelle interface d'action : le CAT. Le nom *CAT* correspond au sigle de l'expression anglaise *Control Action Table* (Table d'Action et de Contrôle). Une des raisons du choix de ce nom a été la volonté de marquer une rupture avec la souris de bureau. En effet, la thématique de l'interaction avec des EV affichés au moyen d'IVC étant très différente de la thématique du déplacement d'un curseur sur un écran de taille réduite, il nous a semblé important de ne pas considérer notre interface comme une nième adaptation de la souris (eg. gyromouse, cubic mouse,

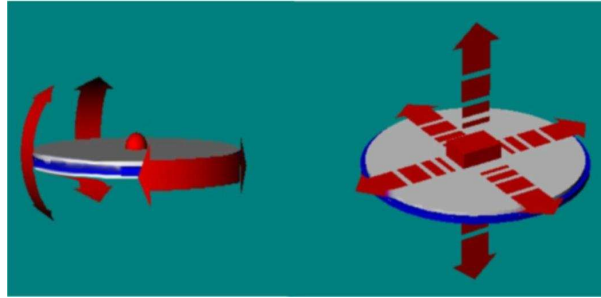


Figure 15: Les 6 degrés de liberté du plateau. Les rotations (à gauche) s'effectuent selon un mode de résistance isotonique alors que les translations (à droite) s'effectuent selon un mode de résistance isométrique.

spacemouse), mais plutôt comme une interface répondant à des motivations propres à notre thématique. Le premier nom du CAT a été *Interaction Table* (Table d'Interaction).

Le concept principal sous-jacent au fonctionnement du CAT est de donner aux utilisateurs la possibilité de manipuler des objets virtuels à travers un plateau réel, comme s'ils tenaient directement les objets dans leurs mains. D'un point de vue cognitif, cette approche peut être rattachée à la notion de schème sensori-moteur d'utilisation proposée par Piaget [Pia79]. Pour Piaget, un schème est ce qui dans une action est transposable dans la même situation ou généralisable dans des situations analogues. Fuchs argumente que l'utilisation de schèmes pour la réalité virtuelle favorise l'immersion et l'interaction pseudo-naturelle, car les compétences nécessaires à la réalisation d'une action dans le monde virtuel ont préalablement été acquises dans le monde réel [FMP01]. De ce fait, les actions effectuées dans les EV se font de manière naturelle et donc sans (ou avec peu) effort mental. Au niveau du CAT, nous pouvons dire que les rotations d'un objet virtuel se basent sur le schème de la manipulation d'un objet réel.

En ce qui concerne les translations avec le CAT, il n'est plus possible de parler de schème. Cependant, le lien sémantique entre les forces appliquées sur le plateau et le déplacement d'un objet dans l'EV peut se mettre rapidement en place, étant donné que le déplacement de l'objet aura lieu dans la direction dans laquelle la force aura été appliquée.

4.2 Réalisations physiques

La version du CAT que nous utilisons n'est actuellement qu'un prototype. Ce prototype est issu de constructions expérimentales. De futurs prototypes sont actuellement à l'étude.

4.2.1 Constructions expérimentales

Une première réalisation physique a été construite pour servir de base de discussion aux futures versions du CAT. Cette réalisation simpliste illustrée en figure 16 nous a permis de sentir les mouvements d'un plateau autour d'un point. Nous avons expérimenté un système à base de ficelles pour permettre au plateau de rester dans un état de stabilité au moment où il était relâché. A partir de cette première réalisation, nous avons construit un prototype capable de récupérer les mouvements appliqués sur le plateau (figure 17). Pour cela, nous



Figure 16: Le premier prototype du CAT

avons utilisé un joystick analogique, une souris, une spacemouse, et une tablette graphique. Nous avons fixé le manche du joystick sur un pied fixe en bois. La base de ce joystick, située au-dessus du manche, pouvait donc être orientée avec un petit débattement, suivant deux ddl. Nous avons ensuite fixé un plateau en bois au-dessus de la base du joystick à travers une liaison tournante à base de roulements à billes. La rotation du plateau autour de cet axe entraînait la rotation de la boule de la souris, ce qui nous permettait de récupérer la quantité de rotation suivant ce troisième ddl. Nous avons fixé la spacemouse entre le plateau tournant et un plateau supérieur afin de récupérer les forces appliquées sur ce dernier.

Ce prototype nous a permis de valider les concepts fondamentaux du CAT. Cependant, sa construction artisanale posait des problèmes d'utilisation. En particulier, le poids du plateau supérieur entraînait une force plus importante que la force maximale prévue pour la spacemouse, ce qui conduisait à un effort de stabilisation de la part de l'utilisateur. Ce prototype a été abandonné.

4.2.2 Prototype actuel

N'étant pas mécaniciens, nous nous sommes tourné vers le laboratoire de Mécanique Physique de l'Université Bordeaux 1 (UMR CNRS 5469) pour la réalisation d'un premier prototype utilisable du CAT. Ce premier prototype, répondant au cahier des charges que nous nous

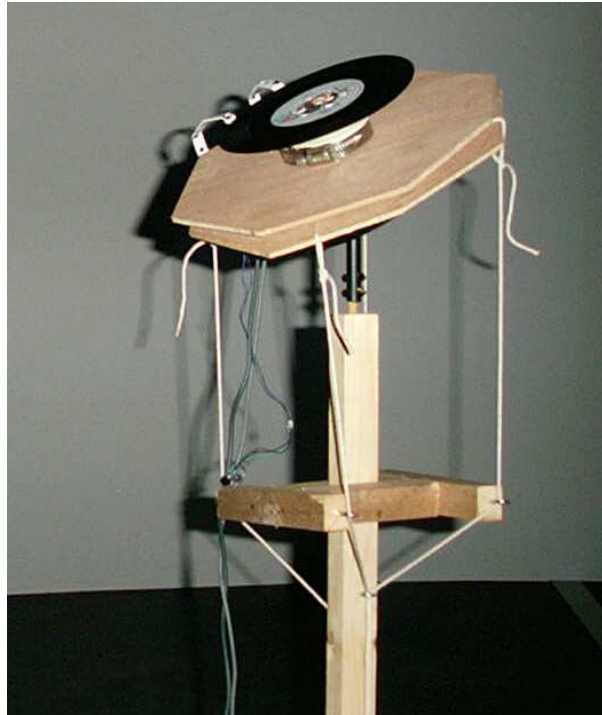


Figure 17: Le deuxième prototype du CAT

étions fixé, a été conçu et réalisé par Y. Couétard. Il mesure un mètre de haut et cinquante centimètres de large (figure 18) et correspond à la version du CAT que nous utilisons. Bien que cette version soit opérationnelle, elle est amenée à évoluer, comme nous le verrons plus loin.

Rotations

Pour ce qui est des rotations, un système d'axes imbriqués permet au plateau de tourner selon toutes les directions, comme illustré en figure 19. Le plateau est attaché en son centre au milieu d'une barre horizontale, à travers un axe de rotation vertical. Cet axe de rotation est appelé *Lacet*. Les extrémités de la barre horizontale sont attachées à un cerceau extérieur à travers des liaisons tournantes. L'ensemble plateau/barre-horizontale peut donc pivoter de droite à gauche autour d'un axe horizontal appelé *Roulis*. Enfin, le cerceau extérieur peut pivoter d'avant en arrière par rapport au pied fixe. Ce dernier axe de rotation est appelé *Tangage*. Ce système du type "suspension à la cardan" est utilisé pour les fourneaux dans la marine, et les gyroscopes d'une façon générale.

Pour chacun des axes de rotations, un potentiomètre fournit un signal entre 0 et 10 Volts, proportionnel à l'angle récupéré entre 0 et 2π . Des connecteurs tournants servant à transmettre les données permettent d'appliquer des rotations infinies suivant chacun des axes. L'ensemble du système étant équilibré, le plateau du CAT ne bouge pas quand il est relâché, quelle que soit son orientation.



Figure 18: Le prototype actuel du CAT

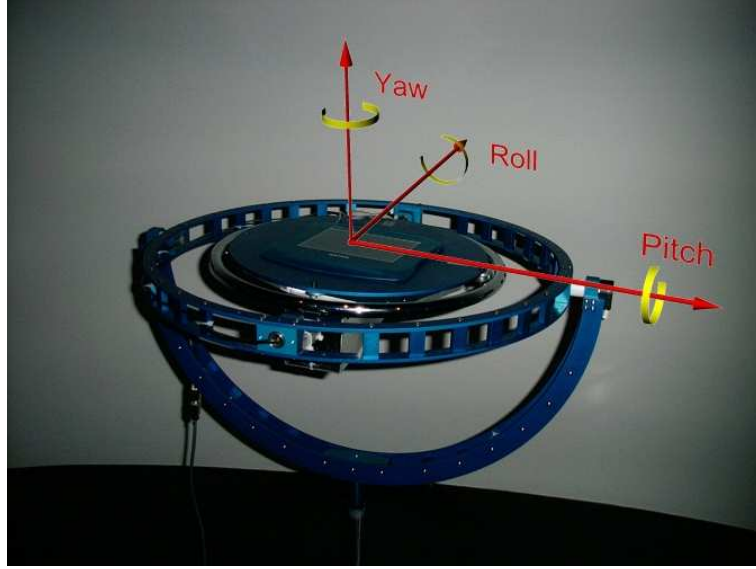


Figure 19: Les axes de rotation du CAT, *Lacet (Yaw)*, *Tangage (Pitch)* et *Roulis (Roll)*

Forces

Pour ce qui est de la récupération des forces, le CAT utilise le dynamomètre à six composantes développé par Couetard [Cou00]. La réalisation de ce dynamomètre a fait l'objet d'un brevet national (93-08370 CNRS-LMP). Le dynamomètre à 6 composantes permet de mesurer des forces et des moments. Nous n'utilisons que les forces pour le CAT.

Le dynamomètre est fixé en son centre, sous le plateau du CAT. Il est composé de trois bras disposés à 120° qui maintiennent un cerceau autour du plateau du CAT. Sur chacun de ces bras, des capteurs permettent de récupérer les forces appliquées suivant deux axes perpendiculaires à l'axe du bras, comme illustré en figure 20

Lorsqu'une force \vec{F} est appliquée sur le cerceau, le dynamomètre détecte deux forces par bras selon les axes $(U_i, V_i)_{i=(1,2,3)}$. Les forces appliquées dans le repère $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ peuvent être déduites de la façon suivante.

Les forces $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$ exercées aux points $A, B,$ et C s'écrivent :

$$\vec{F}_1 = F_{11}\vec{U}_1 + F_{12}\vec{V}_1 \quad (1)$$

$$\vec{F}_2 = F_{21}\vec{U}_2 + F_{22}\vec{V}_2 \quad (2)$$

$$\vec{F}_3 = F_{31}\vec{U}_3 + F_{32}\vec{V}_3 \quad (3)$$

L'équation des moments ($\sum \vec{M} = 0$) étant toujours vérifiée en raison des trois ddls en rotation du cerceau du CAT, l'équilibre statique du système s'écrit :

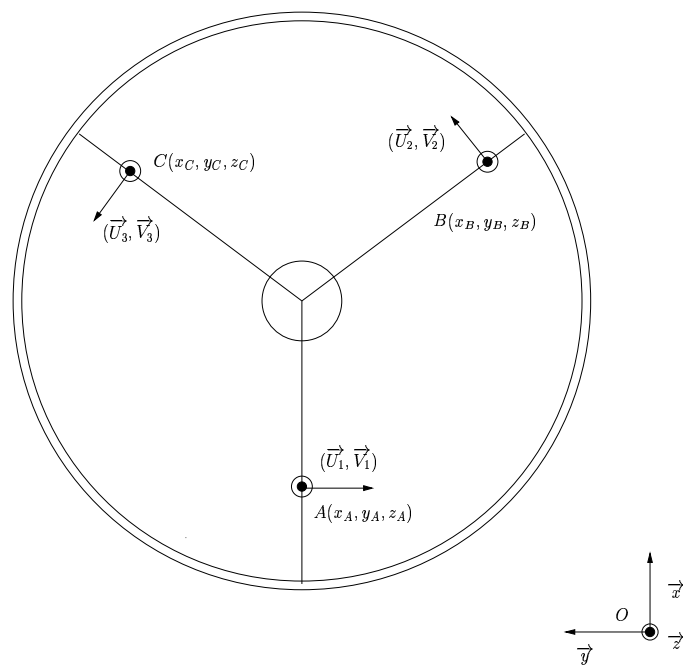


Figure 20: Le dynamomètre à 6 composantes

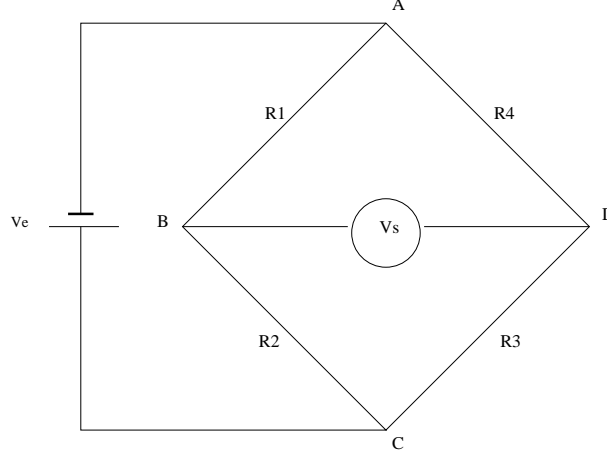


Figure 21: Pont de wheastone

$$\vec{F} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0 \text{ soit } \vec{F} = -\vec{F}_1 - \vec{F}_2 - \vec{F}_3 \quad (4)$$

D'où, après projection sur $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 1 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -F_{11} \\ -F_{12} \\ -F_{21} \\ -F_{22} \\ -F_{31} \\ -F_{32} \end{pmatrix} \quad (5)$$

La matrice (6x3) correspond à la matrice géométrique du dynamomètre (si l'on ne considère que les forces).

Les forces appliquées sur chacun des bras sont récupérées au moyen de trois capteurs de flexion. Chaque capteur de flexion est équipé de deux ponts de flexion ; un pour la composante \vec{U}_i et un pour la composante \vec{V}_i .

Un pont de flexion est composé de 4 jauges de déformation montées en pont de Wheastone. Une jauge de déformation est constituée par un fil fin collé sur un support. Lorsque le support se déforme, le fil subit un étirement, ce qui modifie sa résistance ohmique. Cette relation est illustrée par l'équation :

$$\frac{\delta R}{R} = k \frac{\delta L}{L} \quad (6)$$

où L est la longueur du fil et R la valeur de la résistance.

Un pont de Wheastone, comme illustré en figure 21, est un montage électrique dans lequel la tension en sortie est fonction des résistances qui composent le pont.

Un tel montage permet de modifier le signal de sortie dès qu'il y a une variation des résistances δR_i infiniment petite. Pour le montage présenté sur la figure 21, on obtient la relation :

$$V_S = \frac{V_e}{4} \left(\frac{\delta R_1}{R_1} - \frac{\delta R_2}{R_2} + \frac{\delta R_3}{R_3} - \frac{\delta R_4}{R_4} \right) \quad (7)$$

L'application d'une force sur le cerceau du CAT implique une déformation des bras du dynamomètre, donc une modification de la résistance des jauges, et donc un changement des valeurs de tension dans les ponts de flexion, proportionnel aux forces appliquées. Finalement, la force appliquée sur le dynamomètre s'écrit :

$$F = MKV \quad (8)$$

où M est la matrice géométrique du dynamomètre, K est la matrice contenant les coefficients de proportionnalité entre les forces appliquées sur chacun des bras et les tensions récupérées par les ponts, et V est la matrice contenant les 6 tensions de sortie récupérées par les ponts.

Le calcul des coefficients de la matrice K se fait grâce à un étalonnage. Cet étalonnage consiste à suspendre des poids connus au dynamomètre, pour différentes orientations du plateau. On obtient ainsi des tensions de référence qui vont nous permettre d'établir des relations de proportionnalité entre les forces appliquées et les tensions récupérées. La matrice MK est fixée une fois pour toute après l'étalonnage. Les forces appliquées sur le cerceau du CAT sont donc obtenues en multipliant la matrice MK par les 6 tensions de sortie.

Tablette graphique et boutons

La récupération des orientations du plateau du CAT et des forces appliquées sur le cerceau font du CAT une interface d'action à 6 ddls. De plus, nous avons ajouté une tablette graphique sur le plateau pour l'utilisation de techniques d'interaction 2D. Cette tablette permet de récupérer la position d'un stylet sur la surface du plateau. Des événements discrets sont récupérés à travers les boutons du stylet, ou à travers les boutons d'une souris, fixée sur le coté du CAT.

4.2.3 Limitations

Le prototype que nous venons de présenter est fonctionnel. Les techniques d'interaction, les évaluations, et les applications présentées dans la suite de ce document ont été réalisées à partir de cette version du CAT. Cependant, nous pensons que des évolutions matérielles pourraient être apportées pour obtenir une version plus aboutie du CAT. En particulier, le prototype actuel a montré plusieurs limitations.

Tout d'abord, le poids de ce prototype est encore trop élevé. La structure lourde du système handicape la finesse de déplacement du plateau autour de ses axes de rotations. De plus, l'ensemble du prototype est difficilement transportable. Nous pensons qu'une piste de réflexion pour les versions futures est l'utilisation de matériaux plus légers que le métal actuellement utilisé.

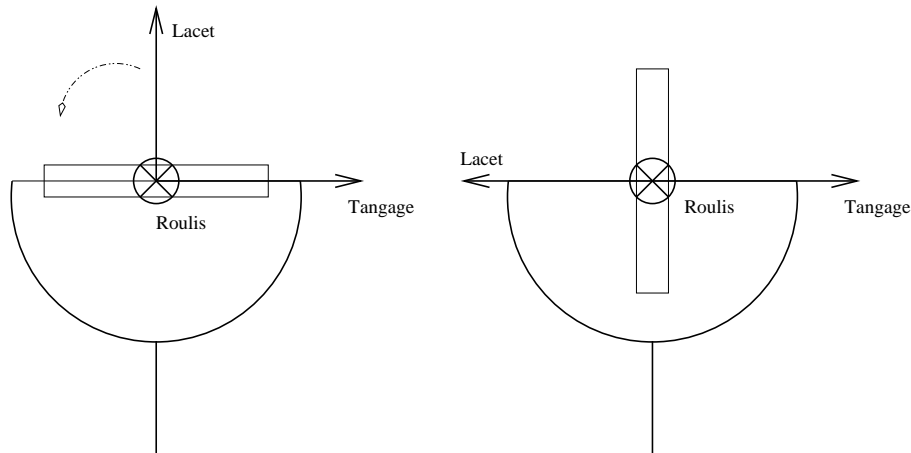


Figure 22: Perte d'un ddl entraînée par une orientation particulière du plateau du CAT

Ensuite, il est apparu que l'utilisation d'axes de rotations emboîtés pour l'orientation du plateau n'était peut-être pas la meilleure solution. L'avantage d'une telle approche est de permettre des rotations infinies selon n'importe quel axe. L'inconvénient est qu'une structure d'axes emboîtés entraîne des rotations difficiles à réaliser. En effet, une telle structure amène à des situations où un ddl peut être perdu, comme illustré sur la figure 22. Nous pensons qu'il serait sans doute souhaitable de favoriser l'espace des rotations possibles, au risque de ne plus pouvoir effectuer des rotations infinies selon toutes les directions. De plus, la présence d'un cerceau autour du plateau s'est avérée gênante lors des rotations du plateau vers l'avant.

Enfin, la version actuelle du CAT utilise des capteurs analogiques nécessitant l'utilisation d'une carte d'acquisition spécialisée. Les versions futures du CAT devront, autant que possible, utiliser des composants numériques permettant une transmission de données à travers une interface standard type USB.

4.2.4 Futur prototype

Un financement, récemment accordé par le pôle ETICA ¹, va nous permettre de développer un nouveau prototype du CAT, en partenariat avec la société Immersion [Imm]. Nous allons faire appel à des designers industriels ainsi qu'à des ergonomes pour la réalisation de ce nouveau prototype.

Nous pensons qu'une piste pour l'évolution du CAT consisterait à remplacer le système d'axes imbriqués par un système de rotule. Dans ce cas, le plateau ne pourrait plus tourner infiniment. Par contre, les rotations selon n'importe quel axe seraient plus faciles à réaliser.

Concernant la récupération des forces et des rotations, nous pensons que l'utilisation d'un système optique est une piste à explorer.

¹ETICA est un pôle aquitain de compétences en électronique et informatique, ayant pour but de favoriser les relations entre les laboratoires et les entreprises.

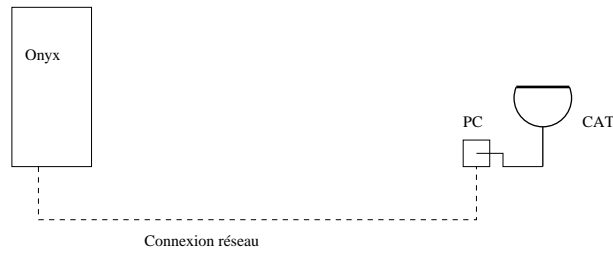


Figure 23: La connexion entre le CAT et l'Onyx passe par un PC

Parmi les évolutions envisageables, on peut aussi imaginer le remplacement de la tablette par un écran tactile. Dans ce cas, les utilisateurs auraient la possibilité d'interagir directement avec leurs doigts. Par contre, une telle approche impliquerait une perte de précision.

Finalement, il est possible d'envisager une évolution du CAT vers un système haptique actif. Au niveau des translations, un système de vibration pourrait être ajouté sur le plateau afin de stimuler le sens du toucher de l'utilisateur lors de collisions avec des objets de l'EV visualisé. Au niveau des rotations, il est possible d'envisager un système permettant de bloquer ou de forcer certaines rotations en fonction d'informations issues des EV. Cependant l'intérêt d'un retour de forces sur les rotations du CAT reste discutable.

4.3 Composante logicielle

La partie logicielle nécessaire à l'exploitation du CAT s'organise autour de deux couches principales : la couche basse chargée de traiter les signaux provenant du CAT et une couche de plus haut niveau qui se charge de l'interprétation des données traitées pour une utilisation dans les applications 3D. Actuellement, la couche basse est localisée sur un PC à proximité du CAT, alors que la couche de haut niveau est gérée au niveau de l'Onyx sur laquelle les applications sont exécutées. La communication entre les deux couches a lieu au moyen d'une connexion réseau, comme l'illustre la figure 23.

4.3.1 Couche Basse

Le CAT fournit 9 signaux en sortie ; 3 issus des codeurs angulaires et 6 relatifs au dynamomètre. Ces signaux sont récupérés sur le PC au moyen d'une carte d'acquisition. Après avoir multiplié les 6 signaux du dynamomètre par la matrice MK décrite précédemment, nous effectuons deux traitements complémentaires.

Sensibilité des rotations

Pour les rotations, nous utilisons l'algorithme présenté en figure 24 pour supprimer les problèmes d'instabilité liés à la sensibilité des capteurs et de la carte d'acquisition. Le principe de cet algorithme, est d'accumuler les petites valeurs et de ne considérer les rotations qu'à partir d'une certaine valeur de seuil d'accumulation. En pratique, la valeur de ce seuil est de l'ordre de 1.5 degré.

Nom: Stabilisation
Role: Eviter les sauts lorsqu'aucune rotation n'est appliquée au plateau du CAT
Entrée: *angle*
Sortie: *angleNouveau*
Déclaration: *v, vPrecedent, accu*
début
 $v \leftarrow$ lire la valeur entrante sur la carte d'acquisition
 $accu \leftarrow v - vPrecedent$
 si $|accu| \geq PRECISION$ **alors**
 $angleNouveau \leftarrow angle + accu$
 $accu \leftarrow 0$
 sinon
 $angleNouveau \leftarrow angle$
 finsi
 $vPrecedent \leftarrow v$
fin

Figure 24: Algorithme de stabilisation des rotations

Les capteurs de rotation étant amenés à évoluer, nous avons préféré utiliser cette solution rapide plutôt que de trouver le filtre idéal adapté aux signaux provenant des codeurs angulaires.

Poids du plateau

Un traitement particulier est effectué au niveau de la couche basse pour contourner le problème du poids du plateau. En effet, le poids du plateau implique des forces non souhaitées sur le dynamomètre. Pour éviter ce problème, notre première approche a été de ne considérer les forces qu'au-delà d'une certaine valeur de seuil correspondant à la force induite par le poids du plateau. Cette approche conduit à une perte de sensibilité du système pour détecter les actions des utilisateurs, car un certain seuil doit être dépassé avant que les forces appliquées ne soient prises en compte.

Nous avons donc choisi une deuxième méthode, qui consiste à retrancher à la force mesurée selon chacun des axes du CAT, la composante de la force induite par le poids du plateau. Cette composante est déterminée en fonction de l'orientation du plateau, comme l'illustre la figure 25

Dans le repère statique $(\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$, la force induite par le poids du plateau s'exprime :

$$\overrightarrow{P_{XYZ}} = (0, 0, f) \quad (9)$$

où f correspond à la valeur de la force mesurée selon l'axe \vec{Z} lorsque le plateau est à l'horizontal.

Lorsque le plateau est orienté dans l'espace, la force induite par le poids du plateau se répartit sur les différents axes du dynamomètre. Dans le repère du dynamomètre, cette force s'exprime :

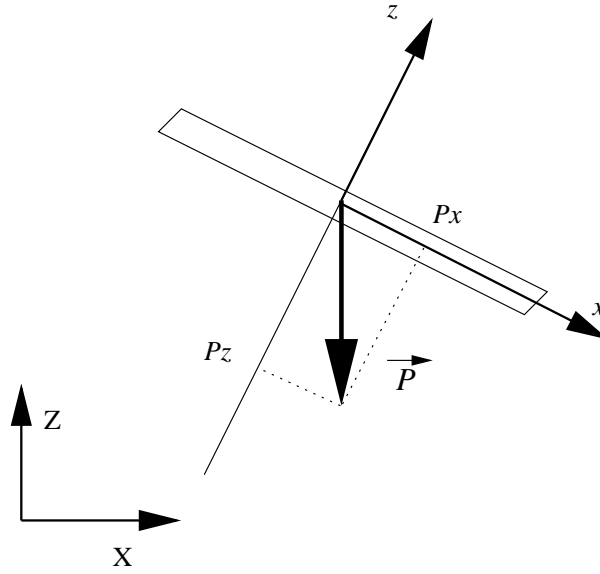


Figure 25: Influence du poids du plateau sur les forces récupérées par le dynamomètre (2D)

$$\overrightarrow{P_{xyz}} = \overrightarrow{P_{XYZ}} M \quad (10)$$

où M est la matrice de passage du repère statique $(\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ au repère du dynamomètre $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

M s'exprime sous la forme :

$$M = M_{Tangage} M_{Roulis} M_{Lacet} \quad (11)$$

avec

$$M_{Tangage} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ 0 & -\sin(\beta) & \cos(\beta) \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$M_{Roulis} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & 0 & \sin(\gamma) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$M_{Lacet} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

où α, β, γ sont les angles correspondant aux axes *Lacet*, *Tangage* et *Roulis*. On obtient donc la matrice de passage :

$$M = \begin{pmatrix} \cos(\gamma)\cos(\alpha) & \cos(\gamma)\sin(\alpha) & \sin(\gamma) \\ -\sin(\beta)\sin(\gamma)\cos(\alpha) & -\sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\alpha) & \sin(\beta)\cos(\gamma) \\ -\cos(\beta)\sin(\alpha) & +\cos(\beta)\cos(\alpha) & \\ -\cos(\beta)\sin(\gamma)\cos(\alpha) & -\cos(\beta)\sin(\gamma)\sin(\alpha) & \cos(\beta)\cos(\gamma) \\ +\sin(\beta)\sin(\alpha) & -\cos(\alpha)\sin(\beta) & \end{pmatrix} \quad (15)$$

Finalement, l'expression de la force induite par le poids du plateau dans le repère du dynamomètre s'écrit :

$$\overrightarrow{P_{xyz}} = f * \begin{pmatrix} -\cos(\beta)\sin(\gamma)\cos(\alpha) + \sin(\beta)\sin(\alpha) \\ -\cos(\beta)\sin(\gamma)\sin(\alpha) - \cos(\alpha)\sin(\beta) \\ \cos(\beta)\cos(\gamma) \end{pmatrix} \quad (16)$$

En retranchant les différentes composantes de $\overrightarrow{P_{xyz}}$ aux valeurs mesurées par le dynamomètre, on supprime l'effet du poids sur le système, et ainsi, on gagne en sensibilité. Quelle que soit l'orientation du plateau, les forces appliquées par les utilisateurs sont détectées, même si ces dernières sont d'intensité très réduite.

Taux de rafraîchissement et transfert des données

La fréquence de l'acquisition et du traitement des données est actuellement de 630 Hertz. Lorsque les données provenant du CAT ont été traitées sur le PC, elles sont envoyées vers l'Onyx à travers des *sockets* sous le format :

TransX TransY TransZ Lacet Tangage Roulis CurseurX CurseurY Button1 Button2

où les **Trans*** correspondent aux forces appliquées sur le plateau du CAT et **Lacet**, **Tangage** et **Roulis** sont les angles correspondants aux différents axes de rotations du plateau par rapport à la position de référence. **CurseurX** et **CurseurY** correspondent aux coordonnées écran issues de la position du stylet sur la tablette et **Button1** et **Button2** correspondent à l'état des boutons de la souris ou du stylet.

4.3.2 Couche de haut niveau

La couche de haut niveau correspond à une bibliothèque de primitives C++. Cette bibliothèque permet l'exploitation des informations contenues dans les sockets provenant du PC sur lequel le CAT est branché. Cette bibliothèque est organisée autour de trois classes principales : *catDriver*, *catManager* et *catGraph*.

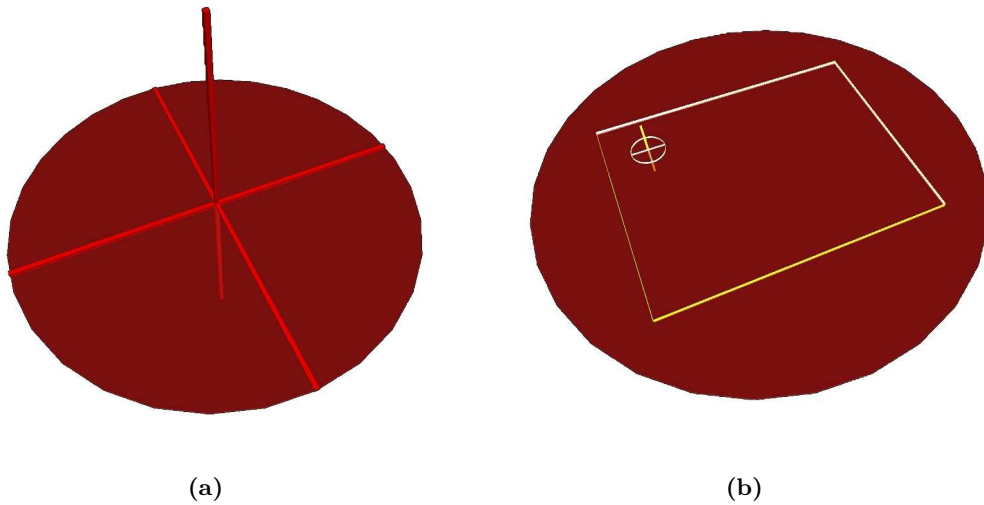


Figure 26: Deux exemples de curseur 3D utilisés avec le CAT

catDriver se charge de la connexion avec le PC, et de la mise à jour des données en fonction des paramètres de contrôle choisis (sensibilités et fonctions de transfert). *catDriver* est indépendante de toute bibliothèque graphique et peut donc être utilisée pour l'exploitation du CAT à partir d'application quelconque écrite en C++.

catManager et *catGraph* utilisent la bibliothèque de rendu à base de graphe de scène OpenSG [osg]. Par conséquent, *catManager* et *catGraph* ont pour vocation d'être utilisées avec des applications écrites sous openSG. *catManager* propose un ensemble de fonctionnalités pour l'utilisation du CAT à travers des techniques d'interaction prédéfinies. Nous détaillerons ces techniques dans le chapitre suivant. *catGraph* centralise les méthodes permettant la gestion d'éléments graphiques relatifs au CAT dans l'EV. Ces éléments graphiques sont au CAT ce que les curseurs 2D sont à la souris. Ils permettent de réaliser un ensemble de techniques d'interaction. La figure 26 présente deux de ces éléments. Les éléments graphiques relatifs au CAT tirent partie de la transparence, comme préconisé par Zhai et Ware [ZBM96].

Le CAT est une nouvelle interface d'action. Nous venons de présenter un prototype de cette interface, ainsi que des composants logiciels permettant son exploitation. Dans le chapitre à venir, nous allons montrer l'intérêt de cette interface pour l'interaction avec des EV.

Chapitre 5

Interagir avec le CAT

L'utilisation de techniques d'interaction, permet la réalisation de tâches d'interaction dans des EV. Par exemple, le contrôle du point de vue avec le CAT dans un EV peut être réalisé de différentes manières [HRG03]. Dans ce chapitre, nous décrivons les techniques d'interaction que nous avons développées pour une utilisation avec le CAT.

Le CAT est une interface d'action qui permet une interaction 3D à partir de ces 6 ddls. Elle permet aussi une interaction 2D à partir de la tablette fixée sur son plateau. Le choix entre ces modes d'interaction dépend de la nature de la tâche d'interaction à accomplir.

5.1 Interaction 3D

Manipuler des objets dans l'espace, ou contrôler des trajectoires de caméra sont des tâches d'interaction 3D nécessitant le contrôle de 6 ddls. Ces tâches peuvent être réalisées au moyen d'interfaces d'action 2D. Cependant, le nombre limité de ddls des interfaces d'action 2D rendent ces dernières peu efficaces pour l'interaction 3D.

Les 6 ddls du CAT, associés à des fonctions de transfert appropriées, permettent une interaction 3D efficace. La composante isotonique du CAT est utilisée pour contrôler des rotations alors que sa composante isométrique permet d'effectuer des translations. En règle générale, une fonction de transfert d'ordre 0 est associée aux rotations, c'est à dire que les rotations dans l'EV correspondent directement aux rotations appliquées au plateau du CAT. Il s'agit d'un mode contrôle de position. Une fonction de transfert d'ordre 1 est associée aux translations, c'est à dire que la vitesse de translation dans l'EV est proportionnelle à la quantité de forces appliquée sur le plateau du CAT. Il s'agit d'un mode contrôle de vitesse.

5.1.1 Manipulation

En manipulant le plateau du CAT, les utilisateurs peuvent manipuler des objets 3D, comme s'ils les tenaient dans leurs mains. Pour orienter un objet selon une direction, il suffit d'orienter le plateau du CAT suivant la même direction. La structure actuelle du CAT permet de faire tourner infiniment les objets sans que les utilisateurs n'aient recours à un système de débrayage. Il est aussi possible de profiter de la force d'inertie du plateau pour observer rapidement un objet sous différents angles. Par exemple, "lancer" le plateau autour de son

axe vertical permet d'appliquer une révolution verticale à l'objet observé. Cela permet une manipulation rapide de ce dernier.

Les forces appliquées par les utilisateurs sont récupérées dans le repère du plateau. Par conséquent, effectuer une translation des objets dans leur repère local en fonction des forces appliquées, permet d'assurer la cohérence entre les mouvements des utilisateurs et le déplacement des objets. Ainsi, pour déplacer un objet dans une direction donnée, les utilisateurs n'ont qu'à pousser le plateau dans une direction correspondante. L'utilisation d'un mode de résistance isométrique associé à une fonction de transfert d'ordre 1, permet de déplacer les objets sur des distances infinies. La vitesse de déplacement des objets dépend de la quantité de forces appliquées sur le plateau.

Les objets manipulés peuvent correspondre à des objets individuels, à des groupes d'objets, ou à des scènes entières selon le principe de *scene-dans-la-main* de Ware [WO90]. Le centre de rotation que nous utilisons pour la manipulation de ces objets correspond au centre de la boîte englobante de ces derniers. La technique d'interaction que nous venons de décrire pour la manipulation d'objets est appelée *trackball*.

Nous avons étendu la technique du trackball pour permettre aux utilisateurs de faire tourner les objets autour de points autres que les centres des boîtes englobantes. Cette technique, appelé *trackball ciblé* consiste à utiliser une représentation du plateau du CAT dans l'EV ; *le plateau virtuel*. Le plateau virtuel a en permanence la même orientation que le plateau réel, ce qui permet aux utilisateurs de "tenir" le premier à travers le deuxième. Le plateau virtuel est utilisé comme pivot pour les rotations des objets à manipuler. Les utilisateurs déplacent le plateau virtuel dans l'espace pour choisir un point de pivot. Lorsqu'ils cliquent sur un bouton (stylet ou souris), les objets à manipuler sont attachés aux mouvements du plateau virtuel ; les rotations interviennent autour du pivot. En cliquant à nouveau sur le bouton, les mouvements appliqués au CAT n'ont plus d'influence sur les objets à manipuler.

La technique du trackball ciblé permet de modifier le pivot en fonction des points d'intérêt sur lesquels veulent se focaliser les utilisateurs. Par exemple, pour visualiser un modèle de voiture dans sa globalité, les observateurs vont utiliser la technique du trackball. S'ils désirent maintenant observer une zone plus particulière, comme les phares de cette voiture par exemple, alors ils vont utiliser la technique du trackball ciblé pour amener le pivot au niveau de la zone qui les intéresse. Cette approche est illustrée en figure 27.

5.1.2 Contrôle du point de vue

Les 6 ddls du CAT peuvent être utilisés pour le contrôle du point de vue. Pour cela, il suffit d'attacher les mouvements de la caméra aux mouvements du CAT. En indiquant des directions à travers le plateau qu'ils tiennent dans les mains, les utilisateurs peuvent se déplacer dans l'EV. Ils contrôlent la vitesse de déplacement à travers la quantité de forces qu'ils appliquent sur le plateau.

Concernant les rotations, plusieurs alternatives sont possibles. La fonction de transfert associée peut être d'ordre 0 ou d'ordre 1. Une fonction de transfert d'ordre 0 implique que

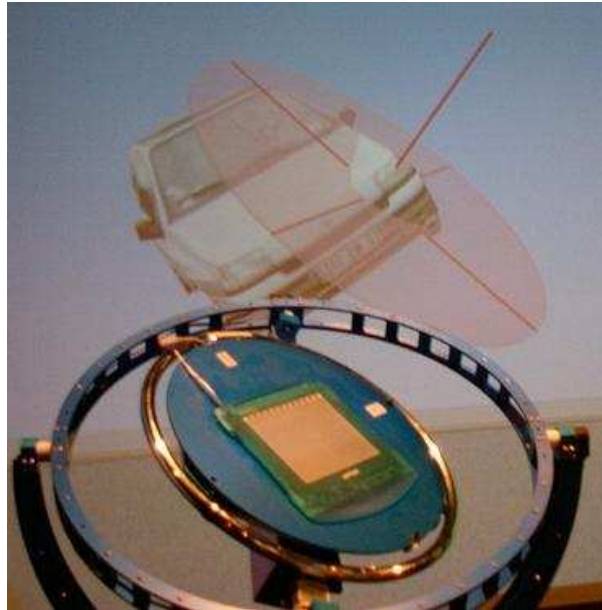


Figure 27: La Technique du *trackball ciblé*

les rotations de la caméra seront directement liées aux rotations du plateau du CAT. Par exemple, tourner le plateau de 90° sur la gauche implique une rotation du point de vue de 90° dans l'EV. Cette approche correspond à la métaphore du *globe-oculaire-dans-la-main* de Ware [WO90]. Cette technique permet aux utilisateurs de visualiser de manière directe l'environnement qui les entoure. Elle peut être utilisée, par exemple, pour inspecter l'intérieur d'un bâtiment.

Lorsque les utilisateurs cherchent à se déplacer dans un EV de grande dimension, une fonction de transfert d'ordre 1 est préférable pour le contrôle des rotations. En effet, cette approche permet aux utilisateurs de changer l'orientation du point de vue, en ne modifiant que légèrement l'orientation du plateau. Ainsi, ils peuvent garder les mains en permanence sur le plateau pour le contrôle des translations. Cette technique s'apparente à la métaphore du *contrôle de véhicule* [WO90], où le CAT joue le rôle d'un volant 3D. L'utilisation d'une fonction de transfert d'ordre 1 permet de déplacer le point de vue avec fluidité.

Lorsqu'une fonction de transfert d'ordre 0 est utilisée, deux approches sont possibles pour le contrôle des rotations. La première consiste à effectuer les rotations dans le repère de la caméra. Dans ce cas, l'orientation du plateau du CAT par rapport au sol correspond à l'orientation de la caméra par rapport à la scène. Cette correspondance offre un retour utilisateur important : l'orientation du plateau sert d'indice aux utilisateurs. Pour visualiser la scène "à l'horizontal", il suffit de positionner le plateau du CAT sur le plan horizontal. Cependant, cette approche pose des problèmes de cohérence entre les mouvements du plateau et les mouvements de l'image sur l'écran. La figure 28 illustre un exemple d'incohérence lié à l'application des rotations dans le repère de la caméra.

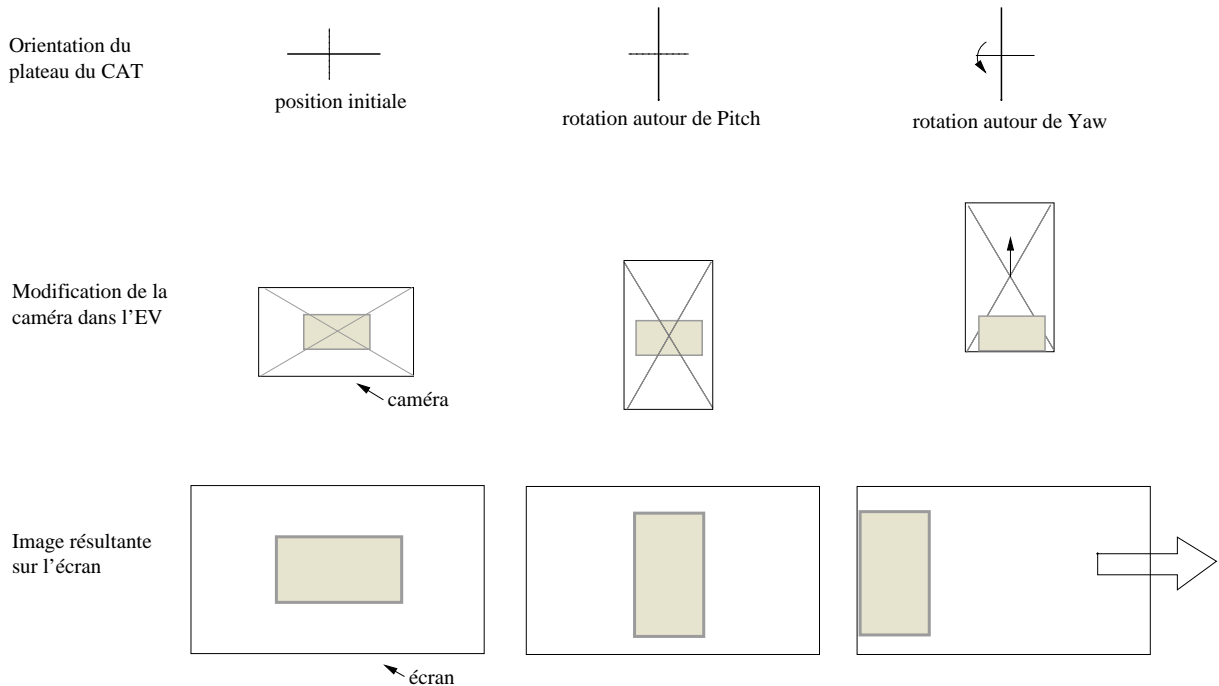


Figure 28: Rotations dans le repère caméra. Cet exemple montre une incohérence liée à l'application des rotations dans le repère caméra : les mouvements de l'objet sur l'écran ne correspondant pas directement aux mouvements appliqués sur le plateau du CAT.

Pour éviter ce problème, une deuxième approche consiste à effectuer les rotations dans les repères cumulés de la caméra et du plateau du CAT (Figure 29). Dans cette configuration, les mouvements sur l'écran sont cohérents avec les mouvements du plateau. Par contre, l'inconvénient d'une telle approche est qu'il n'existe plus de correspondance entre l'orientation du plateau par rapport au sol et l'orientation du point de vue par rapport à la scène. Des situations perturbantes peuvent alors survenir, comme par exemple l'affichage de la scène à plat avec le plateau du CAT orienté vers la gauche.

Finalement, la technique d'interaction à utiliser pour contrôler le point de vue dépend de la nature de l'EV. Un contrôle de la vitesse associée à la composante isotonique du CAT est préférable pour les EV de grandes dimensions alors qu'un contrôle de la position sera plus adaptée aux EV de dimensions réduites. Pour les EV dont la gravité est fortement marquée (eg. villes, bâtiments), il est préférable d'appliquer les rotations dans le repère de la caméra. Dans ce cas, les utilisateurs auront un repère vis-à-vis de leur orientation dans l'EV grâce à l'orientation du plateau par rapport au sol. Pour les EV dont la gravité n'est pas fortement perçue (eg. molécules, organes), il est préférable d'appliquer les rotations dans les repères cumulés de la caméra et du plateau du CAT.

Les fonctions de transfert d'ordre 0 et d'ordre 1 peuvent être mélangées. Par exemple, pour la navigation dans un environnement urbain, il peut être souhaitable d'utiliser un contrôle de position pour les rotations selon les axes *Pitch* et *Roll*, et un contrôle de la vitesse pour les rotations selon l'axe *Yaw*. Ainsi, avec des transformations qui opèrent dans le repère de la caméra, l'orientation du plateau du CAT donne un repère vis-à-vis de l'orientation de la

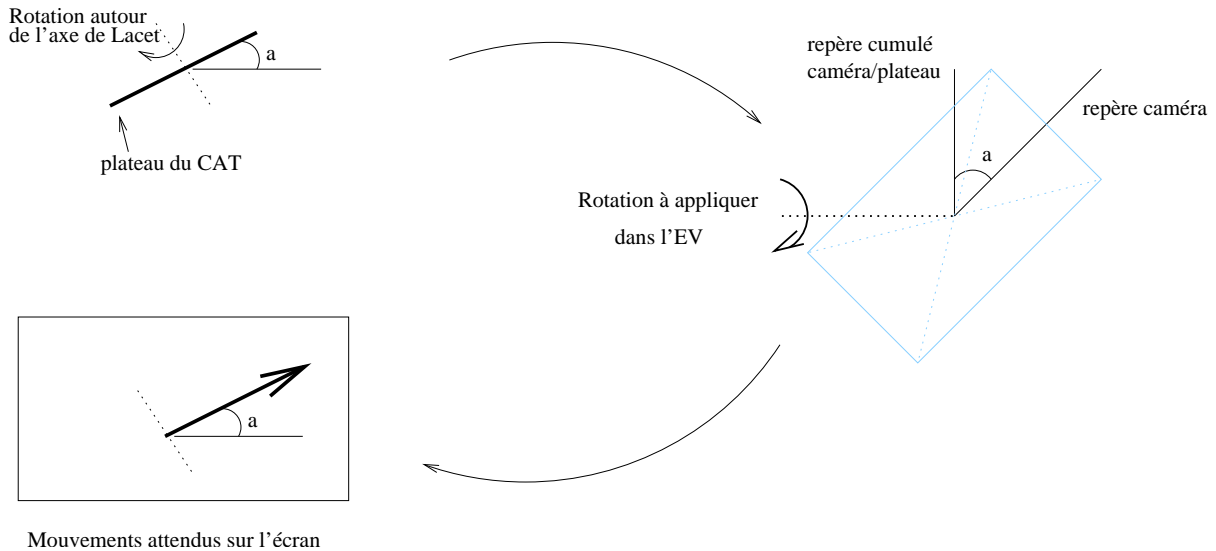


Figure 29: Repères cumulés caméra/plateau. Appliquer les rotations dans les repères cumulés du point de vue et du plateau assure une cohérence entre les mouvements du plateau et les mouvements de l'image affichée sur l'écran.

caméra par rapport au sol de la ville. L'utilisation d'un contrôle de vitesse pour l'axe *Yaw* permet de survoler l'environnement à travers des trajectoires fluides.

5.2 Interaction 2D

Le plateau du CAT sur lequel repose une tablette graphique permet de contraindre les mouvements d'un stylet sur un plan 2D. Cette caractéristique permet d'effectuer des techniques d'interaction 2D dans l'environnement 3D. Le principe général des techniques d'interaction 2D que nous utilisons consiste à faire correspondre aux mouvements du stylet sur la tablette, les mouvements d'un curseur sur un plan virtuel. Ce plan virtuel est positionné dans l'EV au moyen de la composante 3D du CAT. Les techniques d'interaction 2D que nous utilisons s'organisent autour de deux métaphores : la métaphore du *plateau virtuel* et la métaphore de l'*écran virtuel*.

5.2.1 Le plateau virtuel

La première métaphore consiste à déplacer le curseur sur le plateau virtuel. L'orientation identique du plateau réel et du plateau virtuel implique une relation forte entre la position du curseur dans l'EV et la position du stylet sur la tablette. Par exemple, déplacer le stylet en direction de l'écran impliquera un déplacement du curseur en profondeur, dans l'EV. Cette correspondance permet la sélection rapide et efficace de points 3D dans l'EV. La sélection de points peut être utilisée pour différentes tâches d'interaction.

Par exemple, au niveau de la navigation, la sélection d'un point dans l'espace permet de définir une cible pour le déplacement automatique du point de vue. Le plateau virtuel joue alors le rôle de piste d'atterrissage, et le curseur sur le plateau indique le lieu précis de l'atterrissage. Nous avons appelé cette technique *atterrissage*. L'intérêt de la technique

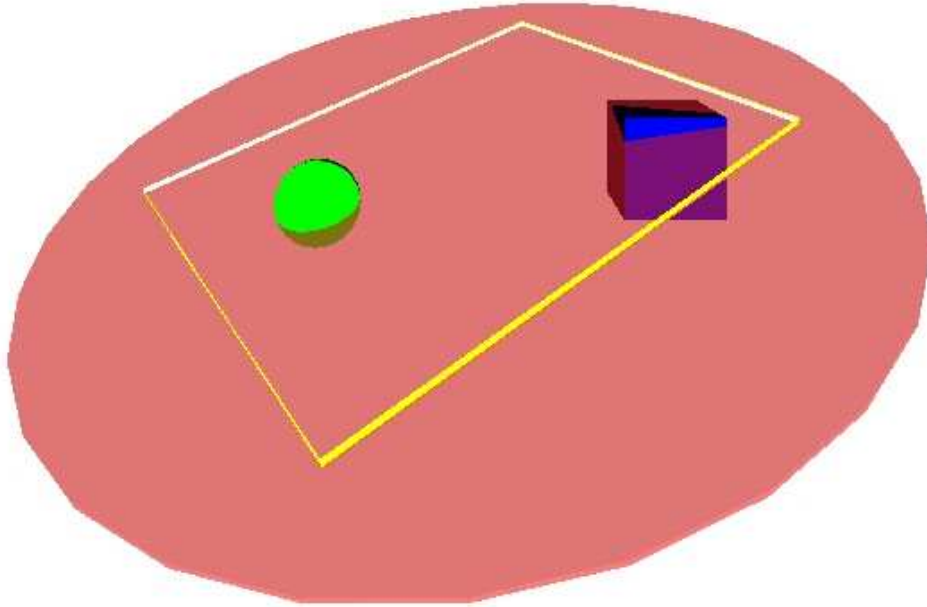


Figure 30: Technique du glissement. Le déplacement du stylet sur la tablette permet de déplacer un objet dans un plan contraint.

d'atterrissage est de déplacer automatiquement le point de vue jusqu'à des cibles qui peuvent ne correspondre à aucun objet de l'EV. Ainsi, il est possible, par exemple, de désigner l'endroit à partir duquel on veut visualiser un objet.

Au niveau de la manipulation, la métaphore du plateau virtuel permet de déplacer des objets avec précision. Plutôt que d'effectuer les déplacements des objets directement dans l'espace 3D, il est parfois préférable de les déplacer dans un plan contraint. La technique du *glissement* consiste à sélectionner un plan de translation au moyen du plateau du CAT, puis à faire glisser les objets au moyen du stylet sur la tablette. Par exemple, supposons qu'une tâche consiste à positionner une sphère sur un cube. L'utilisation de la technique du glissement consiste alors à orienter le plateau virtuel jusqu'à ce qu'il intersecte le haut du cube. Ensuite, la sphère peut être positionnée avec rapidité et précision sur le haut du cube, comme illustré en figure 30. Un mécanisme de recentrage automatique peut être associé à la technique du glissement. Ce mécanisme consiste à recentrer le plateau virtuel sur l'objet manipulé, dès que l'utilisateur cesse de faire glisser le stylet sur la tablette.

La métaphore du plateau virtuel peut être utilisée pour de nombreuses autres tâches d'interaction. L'intérêt de cette métaphore est de simplifier les tâches d'interaction 3D, en réduisant

le nombre de ddls que les utilisateurs ont à contrôler en même temps. Par exemple, la métaphore du plateau virtuel peut être utilisée pour la définition de trajectoires 3D, chaque point de contrôle étant déplacé dans un plan 2D positionné dans l'espace 3D. Cette approche permet aux utilisateurs d'avoir des mouvements précis et rapides dans l'EV.

5.2.2 L'écran virtuel

Alors que la métaphore du plateau virtuel a pour but d'améliorer les performances des utilisateurs pour certaines tâches d'interaction 3D, la métaphore de l'écran virtuel a pour vocation la réalisation de tâches qui ne sont pas de nature 3D. C'est le cas notamment de l'écriture d'annotation, de la lecture d'information, ou même de la sélection d'objet.

Le principe de la métaphore de l'écran virtuel est d'incorporer un écran semi-transparent dans l'EV, pour tirer partie des techniques connues et efficaces, utilisées avec les interfaces de visualisation non immersives. Cet écran peut être déplacé dans l'environnement au moyen de la composante isométrique du CAT mais, à l'inverse du plateau virtuel, la composante isotonique du CAT n'a aucun effet sur l'orientation de l'écran virtuel. L'écran virtuel fait toujours face à la caméra. Les utilisateurs orientent le plateau du CAT de façon à être à l'aise pour travailler. Les déplacements du stylet sur la tablette sont associés aux déplacements du curseur sur l'écran virtuel. Comme l'écran virtuel ne représente qu'une fraction de l'image totale affichée, les déplacements du curseur sur cet écran sont précis, ce qui ne serait pas le cas si le curseur se déplaçait sur la totalité de l'écran de visualisation.

Nous utilisons la métaphore de l'écran virtuel pour différentes tâches d'interaction. La première de ces tâches concerne la sélection d'objets. La sélection d'un objet se fait à travers sa projection sur l'écran virtuel, de la même manière que la sélection d'un objet affiché sur un écran classique se fait à travers sa projection sur cet écran. Nous avons appelé cette technique *sélection-à-travers*. L'intérêt de la *sélection-à-travers* est de permettre aux utilisateurs de sélectionner rapidement des objets alors qu'ils sont immergés dans l'EV. Cette technique peut être réalisée indépendamment du point de vue.

La métaphore de l'écran virtuel est particulièrement adaptée au contrôle du système. En effet, les utilisateurs ont la possibilité d'actionner des boutons ou de sélectionner des items sur l'écran virtuel, comme ils le feraient avec un écran classique. Une fois encore, l'intérêt d'un écran virtuel par rapport à un écran classique est de permettre aux utilisateurs de rester immergés dans l'environnement 3D. La figure 31 présente un exemple d'interface graphique à base de WIMP pour le contrôle du système. Des interface post-WIMP, comme par exemple celles proposées par Baudoin-Lafon [BL01], pourraient être utilisées de la même manière.

Finalement, la métaphore de l'écran virtuel permet d'utiliser, avec les interfaces de perception immersives, les techniques d'interaction développées pour les interfaces de perception non immersives.

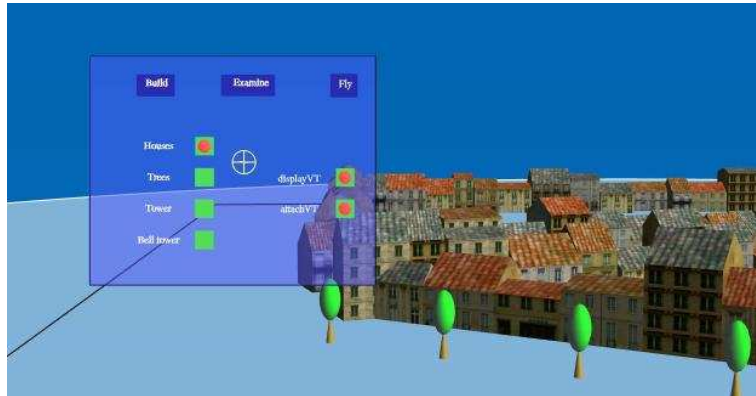


Figure 31: Exemple d'interface graphique pour le contrôle du système

5.3 Techniques d'interaction supplémentaires

Nous venons de décrire un ensemble de techniques d'interaction que nous avons développées pour une utilisation avec le CAT. Nous pensons que de nombreuses autres techniques d'interaction peuvent être utilisées efficacement avec cette nouvelle interface.

C'est le cas notamment des techniques basées sur la métaphore du *monde-en-miniature* [SCP95]. En attachant les mouvements du *monde-en-miniature* aux mouvements du CAT, et en utilisant le stylet pour agir sur cette scène miniature, il est possible d'interagir avec l'EV. De la même manière, la surface physique offerte par le plateau du CAT permet d'envisager l'utilisation de cartes interactives pour la navigation dans des EV de grande dimension.

Une autre piste pour l'utilisation du CAT, concerne l'utilisation de "lentilles magiques" [VCWP96]. Le principe des lentilles magiques est de filtrer la partie de l'EV qui est perçue à travers une lentille. Le plateau virtuel ou l'écran virtuel peuvent être utilisés pour tirer profit de la métaphore des lentilles magiques. Par exemple, le plateau ou l'écran virtuel peuvent servir de loupe pour faciliter la sélection d'objets lointains.

Finalement le design du CAT permet l'utilisation de techniques d'interaction de différentes natures. Les 6 dds permettent l'utilisation de technique d'interaction 3D. La métaphore de l'écran virtuel autorise l'utilisation des techniques 2D classiques et la métaphore du plateau virtuel permet l'utilisation de techniques d'interaction 2D à "l'intérieur" de l'EV.

Nous proposons, dans le tableau 1 des exemples d'utilisation pour les techniques d'interaction que nous avons décrites.

Tableau 1: Exemples d'utilisation des techniques d'interaction décrites.

| Technique | Tâche |
|------------------------------|-----------------|
| Trackball Trackball ciblé | Revue de projet |
| Glissement | Assemblage |
| Globe-oculaire-dans-la-main | Vérification |
| Contrôle de véhicule | Simulation |
| Sélection-à-travers | Exploration |
| Atterrissage | Observation |

Chapitre 6

Caractéristiques du CAT

Nous venons de décrire le CAT et les techniques d'interaction associées pour l'interaction avec des EV. Dans ce chapitre, nous allons maintenant mettre en relief les caractéristiques de l'interface que nous avons développée.

6.1 Une interface adaptée aux IVC

Le CAT présente plusieurs avantages pour une utilisation avec des IVC.

Concernant la taille des écrans, sa composante isométrique associée à une fonction de transfert d'ordre 1 permet aux utilisateurs d'effectuer de grands déplacements dans les EV, sans se déplacer physiquement devant l'écran. L'utilisation de la métaphore de l'écran virtuel permet de contrôler le système, indépendamment de la taille de l'écran.

L'aspect auto-supporté du CAT permet aux utilisateurs de ne pas être contraints par l'interface. En effet, les utilisateurs peuvent interagir avec l'EV, puis faire autre chose, puis revenir interagir sans difficulté. La persistance du CAT permet d'assurer une continuité dans l'application.

Le CAT favorise le travail de groupe. Chacun peut venir interagir facilement avec l'EV pour exprimer son point de vue aux autres utilisateurs. De manière similaire à la barre qui permet de piloter un navire, le CAT est un point de référence dans l'environnement à partir duquel les utilisateurs vont venir interagir avec les EV. Le CAT n'est pas une interface qui permet à tous les utilisateurs d'interagir en même temps, mais une interface qui a pour but d'être accessible à tous, à tout instant.

Le CAT peut être utilisé avec ou sans visualisation stéréoscopique, pour des tâches d'interaction diverses, dans des EV de tailles variables. Par conséquent, le CAT est une interface polyvalente qui peut être bénéfique à de nombreuses applications visualisées au moyens d'IVC.

6.2 Une structure physique avantageuse

6.2.1 Affordances et fonctions d'association

Les affordances du CAT sont liées aux tâches que les utilisateurs souhaitent effectuer dans les EV. Les mouvements possibles avec cette interface sont rapidement déduits de sa forme. Sans la moindre explication, les utilisateurs novices sont tentés d'appliquer des rotations sur le plateau du CAT pour effectuer des rotations dans l'EV.

De plus, associé aux techniques d'interaction que nous avons décrites, le CAT offre de bonnes fonctions d'association. En effet, les actions dans l'EV sont généralement conformes aux actions effectuées par les utilisateurs. Par exemple, en mode trackball, appliquer une force vers la droite implique un déplacement de l'objet sélectionné vers la droite, ce qui n'est pas toujours le cas avec des interfaces 3D.

6.2.2 Retour utilisateur

Le retour utilisateur avec le CAT se situe à différents niveaux. Tout d'abord, l'orientation de son plateau informe directement les utilisateurs de la valeur des rotations fournies au système. Ensuite, dès lors que l'orientation d'un objet est identique à l'orientation de son plateau, le CAT fournit aux utilisateurs un retour haptique passif. En effet, les utilisateurs "tiennent dans leurs mains" l'objet qu'ils sont en train de manipuler. Les affordances, les bonnes fonctions d'association et le retour utilisateur contribuent à l'apprentissage facile du CAT.

6.2.3 Contrainte

Le plateau du CAT fournit une contrainte physique pour l'interaction 2D. Cette contrainte permet d'effectuer des tâches d'interaction avec précision, comme par exemple le déplacement d'un objet dans un plan. L'utilisation de contraintes est essentielle dans tout système interactif [BH95]. Par exemple, l'utilisation de contraintes permet de modéliser des objets 3D de manière plus efficace. Par conséquent, le plateau physique du CAT qui permet de contraindre les mouvements d'un curseur dans un plan 2D, constitue un véritable atout pour les applications 3D.

6.2.4 Ddls séparables et intégrables

Une des caractéristiques du CAT est de permettre la séparation des différents ddls. Par exemple, il est possible d'appliquer une rotation selon l'axe yaw sans appliquer la moindre translation, ou bien il est possible d'appliquer une translation selon une direction sans induire de rotations et de translations parasites. Ainsi, il est possible de déplacer un objet dans un plan, ou d'orienter le point de vue en restant sur place, sans aides logicielles. A l'inverse, les 6 ddls du CAT peuvent être contrôlés en même temps avec une bonne coordination, comme nous le verrons dans la partie évaluation.

6.2.5 Fatigue réduite

L'aspect auto-supporté du CAT permet une utilisation avec une fatigue réduite. Cette caractéristique est importante pour une utilisation prolongée de l'interface au sein d'applications réelles. Les utilisateurs n'ont pas à porter quoi que ce soit. Leurs avant-bras reposent

sur le plateau du CAT qui sert de support. Cependant, comme nous l'avons déjà signalé, les futures versions du CAT devront utiliser des matériaux légers pour une manipulation plus "légère" du plateau.

6.2.6 Système mécanique

Le CAT est un système mécanique permettant l'utilisation de capteurs précis et rapides. La latence liée au temps de récupération de l'information lors de l'action d'un utilisateur est quasi inexistante. Une latence faible permet d'améliorer les performances des utilisateurs dans des systèmes interactifs, comme l'ont montré MacKenzie et Ware [MW93]. De plus, des senseurs mécaniques ne produisent pas d'interférences et ne sont pas sensibles aux interférences. Le CAT peut donc être utilisé avec d'autres interfaces d'actions. Finalement, le CAT n'est pas concerné par les problèmes d'occlusion.

6.3 Limitations

Malgré de nombreux avantages, le CAT présente certaines limitations. C'est le cas notamment des limitations décrites précédemment, liées au prototype actuel : sensibilité, poids, structure limitant certaines rotations. Nous espérons contourner ces limitations dans les futures versions du CAT. De plus, l'encombrement lié au volume du CAT peut être un facteur limitant pour l'utilisation de cette nouvelle interface face à des interfaces de visualisation.

6.4 Comparaison avec les interfaces d'action existantes

Le CAT hérite de plusieurs caractéristiques des interfaces d'action existantes. Sa tablette intégrée est une interface 2D. Sa composante isométrique le rapproche des interfaces 3D de bureau alors que sa composante isotonique lui fait partager des caractéristiques des souris volantes. Finalement, l'utilisation d'une surface physique orientée dans l'espace est une caractéristique commune au CAT et aux interfaces de type tablettes-et-stylets.

6.4.1 Interfaces d'action 2D

Les interfaces d'actions 2D ont montré leur efficacité pour des tâches d'interaction 2D. Elles permettent généralement aux utilisateurs d'effectuer de telles tâches avec rapidité et précision, sans qu'un temps d'apprentissage soit nécessaire. Le CAT tire partie de l'efficacité des interfaces 2D à travers la tablette graphique et les métaphores du plateau et de l'écran virtuel.

Par contre, comme nous l'avons déjà vu, le principal inconvénient des interfaces d'actions 2D est leur mode de fonctionnement basé sur le déplacement d'un curseur sur l'écran limitant l'immersion des utilisateurs dans les EV. Le mode de fonctionnement du CAT pour l'interaction 2D est totalement indépendant de l'écran. Par conséquent, le CAT est adapté aux interfaces de perception immersives.

6.4.2 Interfaces 3D isométriques

L'utilisation d'interfaces 3D isométriques présente plusieurs avantages. Les interfaces 3D isométriques peuvent être acquises facilement. Cela permet aux utilisateurs de ne pas être contraints par l'interface. Le mode de fonctionnement basé sur un contrôle de vitesse permet d'effectuer des mouvements coordonnés dans des EV de taille infinie. Leur utilisation se fait sans fatigue. Le CAT a été conçu pour tirer partie de tels avantages.

D'un autre côté, une utilisation efficace des interfaces 3D isométriques nécessite un long apprentissage. La difficulté d'utilisation est liée au manque de retour utilisateur et au fait qu'il est très difficile d'opérer sur un ddl sans apporter de modifications sur les autres ddls. De son côté, le CAT fournit un retour utilisateur à travers son plateau orienté dans l'espace. La structure et le mode de fonctionnement du CAT permettent de séparer les différents ddls.

6.4.3 Interfaces 3D isotoniques

Le temps d'apprentissage des interfaces 3D isotoniques est très court, ce qui permet aux utilisateurs novices d'effectuer certaines tâches d'interaction avec rapidité. Le contrôle des rotations à travers un plateau qui s'oriente directement dans l'espace permet aux utilisateurs novices de prendre en main le CAT assez rapidement.

A l'inverse, le CAT n'est pas concerné par les inconvénients des interfaces 3D isotoniques. Ces inconvénients sont la fatigue induite par une utilisation prolongée, la difficulté d'acquisition de l'interface, et les contraintes liées à l'anatomie humaine. Ces contraintes impliquent des mouvements limités et parasités par de hautes fréquences liées aux tremblements des utilisateurs. Avec les interfaces 3D isotoniques, la coordination des mouvements dans les EV est dépendante de la coordination des différentes articulations du bras des utilisateurs, ce qui n'est pas le cas avec le CAT.

6.4.4 Tablettes-et-stylets

Nous avons vu que l'utilisation de tablettes-et-stylets pouvait être bénéfique dans les EV affichés à partir d'interfaces de perception immersives. Toutes les techniques d'interaction utilisées avec de telles interfaces sont utilisables avec le CAT, associé à la métaphore du plateau virtuel.

Par contre, l'inconvénient principal d'une approche tablettes-et-stylets est que les utilisateurs doivent porter l'interface en permanence, ce qui est encombrant et fatigant. C'est une des raisons qui explique le fait que ce type d'interface reste à l'état de prototype dans les laboratoires de recherche. La structure du CAT est une solution qui permet de contourner les inconvénients des tablettes-et-stylets.

En conclusion, le design novateur du CAT offre de nombreux avantages pour l'interaction avec des EV, en particulier lorsqu'ils sont affichés au moyen d'IVC. Nous présentons, dans le chapitre suivant, des expérimentations contribuant à l'évaluation formelle du CAT.

Chapitre 7

Evaluation

Nous avons réalisé une première évaluation formelle du CAT à travers une série d'expérimentations. Ces expérimentations ont pour but de comparer les différences de performance des utilisateurs du CAT pour différentes techniques d'interaction. Elles permettent aussi de comparer les différences de performances entre l'utilisation du CAT et l'utilisation d'autres interfaces d'action. Dans ce chapitre, nous décrivons trois de ces expérimentations.

7.1 Méthodes d'évaluation

L'évaluation d'une interface d'action comme le CAT peut se faire à différents niveaux. Le premier indicateur qui permet de renseigner sur l'efficacité d'une nouvelle interface concerne les réactions des utilisateurs. Ces réactions peuvent être collectées au travers de questionnaires de satisfaction qui serviront à l'évaluation qualitative de l'interface. Ces questionnaires constituent souvent le seul moyen d'évaluation des interfaces pour des critères subjectifs. Les utilisateurs sont alors amenés à répondre à des questions du type : "Avez-vous trouvé l'interface d'action agréable à utiliser ?" ou "avez-vous été gêné lors de sa manipulation ?".

D'autres critères peuvent être quantifiés pour une évaluation plus formelle des interfaces pour des tâches particulières. Par exemple, la mesure la plus communément utilisée pour une tâche donnée est le temps de réalisation (*time-on-target*). Une autre mesure est le taux de réussite, pour quantifier la précision de l'interface.

L'apparition d'interfaces d'actions à 6 ddls a conduit à la prise en compte d'un nouveau critère pour l'évaluation des interfaces d'action : la coordination. La mesure de coordination a pour but l'évaluation des capacités des utilisateurs à contrôler efficacement plusieurs ddls en même temps. Ce contrôle coordonné de plusieurs ddls aura pour conséquence la réalisation de mouvements continus dans les EV. Plus une interface d'action permet des mouvements coordonnés, plus elle pourra être considérée comme efficace.

Une méthode pour la mesure de la coordination des interfaces d'action à 6 ddls a été proposée par Zhai et Milgram [ZM98]. Cette méthode consiste à comparer, dans un espace à N dimensions, la longueur de la trajectoire de l'utilisateur à la longueur de la trajectoire optimale. Zhai et Milgram déterminent l'*inefficacité* à travers la relation

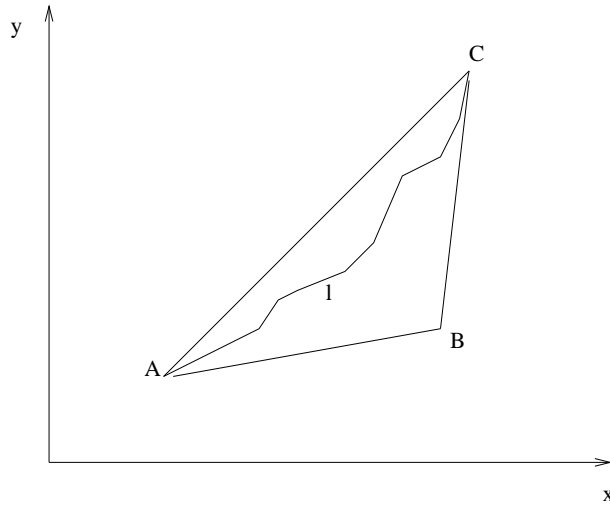


Figure 32: Coordination de 2 ddls

$$\frac{L_{\text{utilisateur}} - L_{\text{optimale}}}{L_{\text{optimale}}} \quad (17)$$

où $L_{\text{utilisateur}}$ est la longueur de la trajectoire réalisée par l'utilisateur et L_{optimale} , la longueur de la trajectoire optimale. Plus la longueur de la trajectoire réalisée par l'utilisateur est éloignée de la trajectoire optimale, moins l'interface sera considérée comme efficace. Par exemple, sur la figure 32, dans un espace 2D, la trajectoire l est plus coordonnée que la trajectoire $AB - BC$.

La mesure d'inefficacité peut être utilisée pour évaluer la coordination des utilisateurs dans l'espace des translations 3D, dans l'espace des rotations 3D, ou encore dans l'espace translations/rotations.

L'évaluation formelle des interfaces d'action à travers la mesure de données quantifiables n'est possible que pour des tâches d'interaction ponctuelles. Par exemple, il est possible d'évaluer les différences de performances entre le CAT et la spacemouse pour une tâche de placement 3D. Par contre, l'évaluation globale du CAT par rapport à la spacemouse est plus délicate, à partir du moment où certaines tâches d'interaction ne peuvent être réalisées efficacement qu'avec l'une des deux interfaces. Par exemple, mesurer les différences de performances des utilisateurs pour la sélection d'objets à travers la métaphore de l'écran virtuel d'une part, et une technique d'interaction particulière utilisée avec la spacemouse d'autre part, n'a pas beaucoup de sens.

7.2 Expérimentations

Nous avons réalisé trois expérimentations pour l'évaluation du CAT. Dans la première expérimentation, nous avons cherché à évaluer les différences de performances des utilisateurs entre l'utilisation de la métaphore du plateau virtuel et celle de la métaphore de l'écran virtuel, pour une tâche de sélection 2D. Dans la deuxième expérimentation, nous avons évalué

différentes configurations pour l'orientation d'un objet dont la position reste fixe. Dans la troisième expérience, nous avons évalué les différences de performances entre le CAT et la spacemouse, pour une tâche précise de placement 3D.

Nous avons travaillé en collaboration avec le Laboratoire de Sciences Cognitives de l'Université Bordeaux 2¹, et particulièrement avec Florence Tyndiuk, pour monter les protocoles expérimentaux. De même, nous nous sommes appuyés sur l'expérience de ce laboratoire pour l'analyse statistique des résultats.

Toutes les expérimentations ont eu lieu à Hémicyclia, la salle de projection immersive de l'Université Bordeaux1. Cette salle est constituée d'un écran hémicylindrique de 10x3 mètres. La projection des images se fait à travers trois vidéoprojecteurs tri-tubes Barco 909. Les applications, développées avec OpenSG, ont été exécutées en mode mono-pipe sur une Onyx2 IR3. Pour toutes les expérimentations, les lumières étaient éteintes et les sujets placés face au centre de l'écran, pour favoriser l'immersion de ces derniers dans les EV.

7.3 Influence de la profondeur pour les tâches d'interaction 2D

7.3.1 Expérience

Nous avons décrit deux métaphores pour l'utilisation de techniques d'interaction 2D. La métaphore de l'écran virtuel consiste à représenter un écran semi-transparent dans l'EV faisant toujours face à la caméra. Dans ce cas, il n'existe pas de correspondance entre l'orientation du plateau du CAT et l'orientation de l'écran virtuel. Quelle que soit l'orientation du plateau, les mouvements du stylet sur la tablette impliquent des mouvements de curseur dans un plan vertical, comme c'est le cas avec les interfaces 2D classiques. La métaphore du plateau virtuel utilise une représentation du plateau du CAT dans l'espace 3D. Dans ce cas, l'orientation du plateau virtuel est la même que celle du plateau réel. Par conséquent, la notion de profondeur intervient sur les mouvements du curseur sur le plateau virtuel.

La métaphore de l'écran virtuel cherche à tirer partie des capacités acquises des utilisateurs pour le déplacement d'un curseur dans un plan vertical, comme c'est le cas avec les équipements de bureau. Nous avons voulu savoir si la notion de profondeur, qui intervient dans la métaphore du plateau virtuel, influençait les performances des utilisateurs. Nous avons fait l'hypothèse que les performances des utilisateurs sont aussi bonnes avec la métaphore du plateau virtuel qu'avec la métaphore de l'écran virtuel, pour une tâche de pointage de cible 2D.

Pour cette expérience, nous avons observé le temps de réalisation de la tâche, le nombre d'essais réussis, et la coordination des mouvements du curseur sur le plan 2D. A l'aide d'un questionnaire, nous avons évalué les préférences des utilisateurs entre les deux métaphores.

¹LSC, <http://www.sm.u-bordeaux2.fr/scico/lsc/>

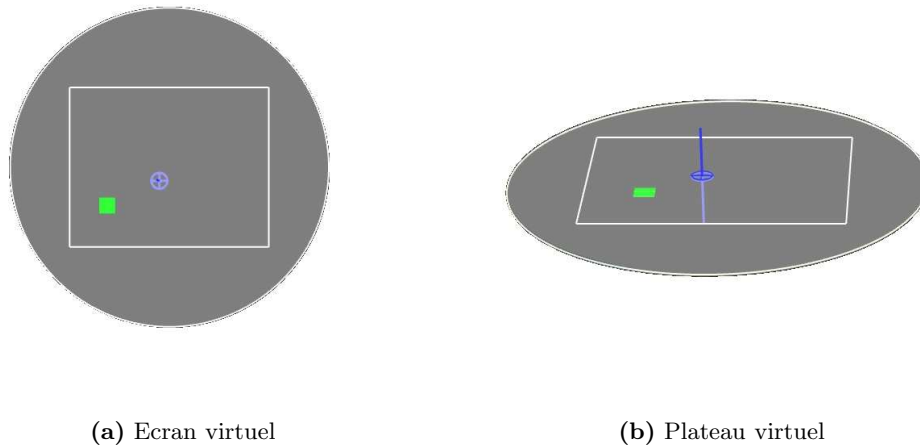


Figure 33: Pointage d'une cible 2D à l'aide du stylet

7.3.2 Tâche

La tâche à réaliser durant l'expérience consistait à amener le curseur du stylet sur un carré situé dans une zone d'affichage correspondant au plateau ou l'écran virtuel (figure 33). Au début de chaque essai, le carré était affiché au centre de la zone d'affichage. Lorsque le sujet cliquait sur le carré, celui-ci apparaissait en une position aléatoire dans la zone d'affichage, et devenait la cible à atteindre. Ce mécanisme permettait d'assurer le fait que le sujet était prêt et que le curseur était situé au centre de la zone d'affichage, au début de chaque essai. Le sujet devait alors bouger le curseur pour l'amener sur la cible. Lorsque le curseur se trouvait sur la cible, cette dernière changeait de couleur. Le curseur devait rester 0.5 secondes sur la cible pour que l'essai soit considéré comme réussi.

7.3.3 Procédure

18 sujets ont passé le test. Nous avons éliminé un sujet dont les données étaient mal enregistrées et un autre sujet qui avait un nombre d'erreurs supérieur à 10. Sur les 16 sujets restants, 10 étaient des hommes et 6 des femmes. Tous les sujets étaient des étudiant(e)s âgé(e)s de 19 à 21 ans. Tous avaient des compétences en informatique mais aucun d'entre eux n'avait d'expérience avec des interfaces immersives.

L'expérience consistait en 25 essais (5 entraînements et 20 essais mesurés) par sujet et par métaphore utilisée. Afin d'éviter l'effet d'ordre, la moitié des sujets a commencé l'expérience avec la métaphore du plateau virtuel alors que l'autre moitié a commencé avec la métaphore de l'écran virtuel. Pour les deux métaphores, l'orientation du plateau était identique (45° selon l'axe *Pitch*, vers l'utilisateur).

7.3.4 Résultats

Nous avons fait des comparaisons des résultats obtenus en mesures répétées pour le temps de réalisation, la coordination et le nombre d'essais réussis. Nous avons utilisé le test paramétrique *t* de student avec une valeur significative $p = 0.05$.

Tableau 2: Comparaison des résultats pour une tâche de pointage 2D

| Temps | | Coordination | | Réussite | |
|------------------------------|-----------|-------------------------------|------------|-------------------------------|-------------|
| VS .44 | VT .43 | VS 1.06 | VT 1.08 | VS 17.69 | VT 18.19 |
| $t(15) = 0.557; p = 0.586NS$ | | $t(15) = -1.364; p = 0.193NS$ | | $t(15) = -0.953; p = 0.355NS$ | |

Les résultats, résumés dans le tableau 2, ont montré qu'il n'existait pas de différence significative de performances des utilisateurs, entre la métaphore du plateau virtuel et celle de l'écran virtuel, pour une tâche de pointage de cible 2D.

Les utilisateurs ont l'habitude de déplacer un curseur sur un écran à l'aide d'une interface d'action 2D. La métaphore de l'écran virtuel tire partie de cette compétence acquise pour le déplacement d'un curseur sur un écran virtuel. Comme nous ne trouvons pas de différences significatives entre les deux métaphores, nous pouvons dire que le déplacement d'un curseur sur un plan orienté dans l'espace 3D peut être aussi efficace que le déplacement "classique" d'un curseur dans un plan vertical. Comme il est convenu de considérer ce mode de déplacement "classique" comme efficace, on peut dire que l'interaction 2D dans un EV à travers la métaphore du plateau virtuel est efficace. Le CAT peut donc profiter de cette interaction 2D efficace pour l'interaction avec des EV.

Concernant le questionnaire de satisfaction, il est apparu que les sujets ne se sont pas trouvés perdus, et que la réponse donnée par le système avec chacune des deux métaphores correspondait à leurs attentes.

La majorité des sujets (75 %) a préféré utiliser la métaphore du plateau virtuel que celle de l'écran virtuel. Nous pensons que cette préférence peut être expliquée par l'attrait de la nouveauté liée à la métaphore du plateau virtuel, et par le fait que la fonction d'association utilisée pour cette métaphore est plus directe que celle utilisée avec la métaphore de l'écran virtuel.

7.4 Orientation d'un objet

7.4.1 Expérience

Dans cette deuxième expérience, nous avons cherché à évaluer les différences de performances des utilisateurs pour une tâche d'orientation d'un objet sous trois configurations différentes. Les configurations **CAT+** et **CAT-**, permettaient de modifier l'orientation de l'objet à l'aide du CAT alors que la configuration **Sp.** permettait de modifier son orientation à partir d'une spacemouse. La différence entre **CAT+** et **CAT-** était que, dans le premier cas, l'orientation de l'objet était identique à l'orientation du plateau du CAT en tout instant, alors que dans le deuxième cas, un décalage d'orientation existait entre l'objet et le plateau.

Nous avons fait l'hypothèse que les performances des utilisateurs étaient meilleures lorsqu'il y avait une correspondance entre l'orientation du plateau du CAT et l'objet manipulé (cas **CAT+**), plutôt que quand il n'existait pas de correspondance directe (cas **CAT-**). De plus, nous

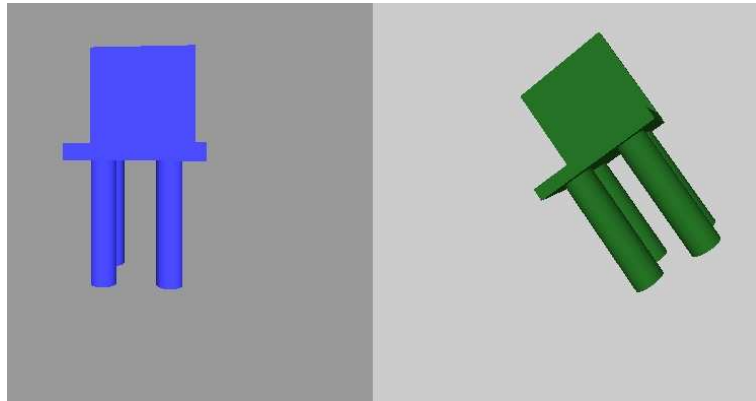


Figure 34: Tâche d'orientation de la chaise source (à gauche) vers la chaise cible (à droite).

avons fait l'hypothèse que la configuration CAT+ permettaient de meilleures performances que la configuration Sp.

Pour cette expérience, nous avons observé le temps de réalisation de la tâche et la coordination des mouvements dans l'espace des rotations.

7.4.2 Tâche

Deux fenêtres sur l'écran étaient proposées aux sujets. Une chaise source sur la fenêtre de gauche pouvait être orientée au moyen des différentes configurations décrites ci-dessus. Une chaise cible était affichée sur la fenêtre de droite avec une orientation aléatoire (figure 34). Il était demandé aux sujets d'orienter la chaise source identiquement à la chaise cible, aussi rapidement que possible.

Pour CAT+ et CAT-, les sujets devaient repositionner le plateau du CAT dans sa position initiale avant chaque essai. Après une seconde, la cible apparaissait dans une orientation aléatoire. La tâche commençait alors. Elle était considérée comme terminée lorsque les deux chaises avaient une orientation identique, à une tolérance spatiale près.

7.4.3 Procédure

16 sujets ont réalisé cette expérience (8 hommes et 8 femmes). Tous étaient des étudiants âgés de 21 à 24 ans n'ayant pas d'expérience avec des interfaces d'action 3D. Après une brève explication, il a été demandé aux sujets de réaliser 30 tests sous chacune des configurations. L'ordre de passage des différentes configurations variait d'un sujet à l'autre.

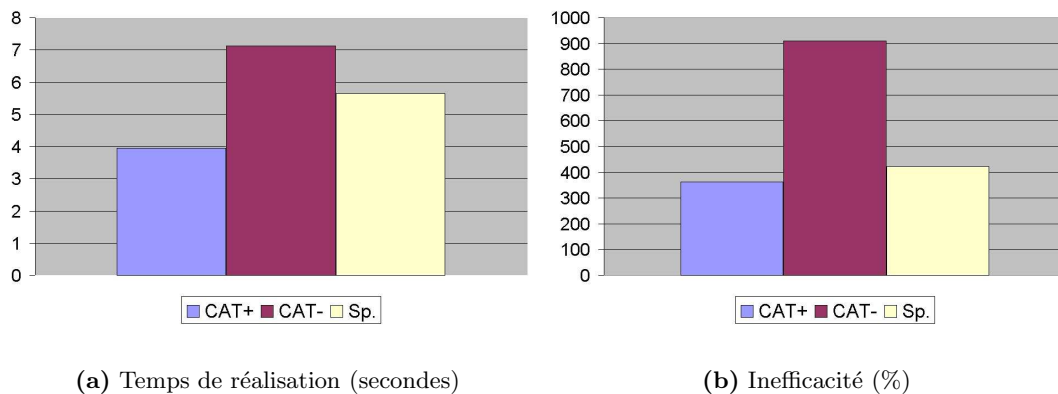
Pour chaque test, l'orientation de la chaise source était choisie parmi 8 orientations prédéterminées.

7.4.4 Résultats

Pour chaque test, nous avons mesuré le temps de réalisation et l'inefficacité dans l'espace des rotations. Nous avons effectué une ANOVA à un facteur à trois modalités pour étudier les différences entre les trois configurations. Nous avons ensuite utilisé le test t de student avec

Tableau 3: Comparaison des résultats pour une tâche d'orientation

| Temps | | | Coordination | | |
|-----------------------------------|------|------|------------------------------------|------|------|
| CAT+ | CAT- | Sp. | CAT+ | CAT- | Sp. |
| 3.94 | 7.13 | 5.64 | 3.63 | 9.11 | 4.23 |
| F(15,2)=12.282 ; p=.000 | | | F(15,2)=11.766 ; p=.000 | | |
| CAT+/CAT- : t(15)=-4.230 ; p=.001 | | | CAT+/CAT- : t(15)=-3.662 ; p=.002 | | |
| CAT+/Sp. : t(15)=-3.744 ; p=.002 | | | CAT+/Sp. : t(15)=-.816 ; p=.427 NS | | |
| CAT-/Sp. : t(15)=2.174 ; p=.046 | | | CAT-/Sp. : t(15)=3.615 ; p=.003 | | |

**Figure 35:** Moyennes obtenues pour une tâche d'orientation

un taux de signification $p = 0.05$ pour affiner cette étude. Le tableau 3 résume les valeurs obtenues. Les moyennes sont illustrées dans la figure 35.

CAT+ vs CAT-. La configuration CAT+ est bien plus performante que la configuration CAT-. Cette différence de performance peut être expliquée par le fait que la configuration CAT+ offre un retour utilisateur important, ce qui n'est pas le cas de la configuration CAT-. En effet, dans le cas CAT+, l'orientation similaire de l'objet manipulé et du plateau du CAT donne l'impression aux utilisateurs qu'ils tiennent l'objet dans leurs mains ; il est alors possible de parler de retour haptique passif. Ce retour utilisateur est beaucoup moins important dans le cas CAT-.

CAT+ vs Sp.. Lorsque nous comparons les configurations CAT+ et Sp., nous nous apercevons que les temps de réalisation avec le CAT sont meilleurs que les temps de réalisation avec la spacemouse. Pour modifier l'orientation d'un objet, des rotations sont appliquées au plateau du CAT alors que des couples sont appliqués à la spacemouse. Contrôler une orientation à travers des rotations est plus direct et donc plus intuitif que la contrôler à travers des couples. Par conséquent, les temps de réalisation sous la configuration CAT+ sont inférieurs en moyenne aux temps de réalisation sous la configuration Sp.

Concernant la coordination, il n'existe pas de différences significatives entre les configurations CAT+ et Sp.. Nous reviendrons sur ce résultat dans l'expérimentation suivante.

CAT- vs Sp.. Si nous comparons les configurations CAT- et Sp., nous nous apercevons que les performances sont moins bonnes avec le CAT qu'avec la spacemouse. Le décalage entre le plateau du CAT et l'objet manipulé perturbe l'utilisateur, et donc affecte les performances de ce dernier.

Conclusion. Finalement, nous avons montré que le fait de tenir un plateau dont l'orientation correspondait à l'orientation de l'objet manipulé améliorerait les performances des utilisateurs pour une tâche d'orientation d'un objet 3D. Nous avons montré que, dans ce cas, le CAT pouvait être plus rapide que la spacemouse, tout en restant aussi efficace.

La perte des performances liée au décalage entre l'objet manipulé et le plateau du CAT nous invite à développer des applications dans lesquelles les objets manipulés ont toujours la même orientation que le plateau du CAT.

Au cours de l'expérimentation, nous avons distingué deux types d'orientations : les orientations où les objets étaient alignés aux axes primaires de l'observateur (90° vers la gauche, vers le haut...) et les orientations quelconques. Nous avons trouvé que les performances des utilisateurs étaient meilleures lorsque les objets étaient alignés avec les axes primaires, indépendamment de la configuration utilisée. Cela tendrait à montrer que l'alignement par rapport aux axes primaires serait un critère lié à l'utilisateur et non un critère lié aux caractéristiques des interfaces utilisées.

Nous venons de décrire une expérimentation faisant intervenir 3 ddls en rotation. Nous allons maintenant décrire une expérimentation faisant intervenir 6 ddls pour une tâche de manipulation précise.

7.5 Manipulation 3D précise

7.5.1 Expérience

Nous avons mené une expérience ayant pour but de comparer les différences de performances entre le CAT et une interface d'action isométrique 3D standard, pour une tâche de manipulation précise d'objets 3D [HGRT03]. Nous avons fait l'hypothèse que, pour une telle tâche, la version actuelle du CAT pouvait être au moins aussi efficace qu'une interface 3D isométrique. Nous avons choisi la spacemouse comme interface isométrique. Pour cette expérience, nous avons observé le temps de réalisation de la tâche, le taux d'erreur, et la coordination des mouvements dans l'EV. De plus, à l'aide d'un questionnaire, nous avons effectué une évaluation qualitative des préférences des utilisateurs entre le CAT et la spacemouse. Pour cette expérience, nous avons utilisé la vision stéréoscopique, afin d'éviter les erreurs liées à la perception de la profondeur.

7.5.2 Tâche

Il a été demandé aux sujets de superposer une source, sur une cible, aussi rapidement que possible. La source et la cible consistaient en des représentations semi-transparentes de

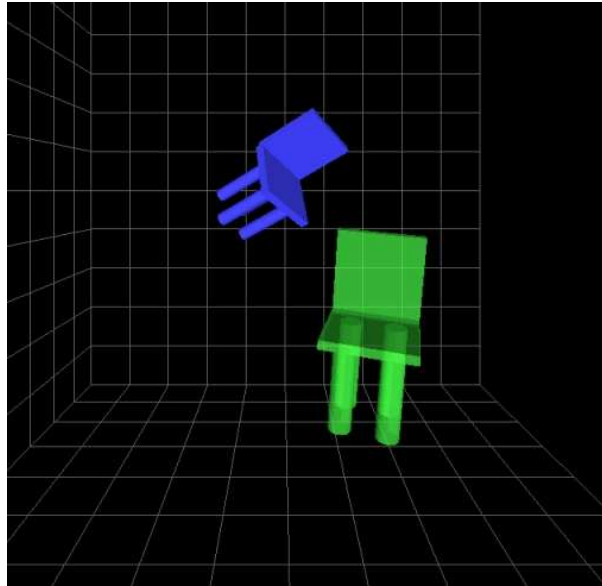


Figure 36: Tâche de manipulation

chaises, comme illustré sur la figure 36. Au début de chaque essai, la source apparaissait au centre de l'espace 3D alors que la cible apparaissait, une seconde plus tard, avec une position et une orientation aléatoires dans un espace borné. A l'aide des 6 ddls de l'interface d'action courante, le sujet manipulait alors la source pour la faire coïncider avec la cible. Lorsque la position et l'orientation de la cible et de la source étaient identiques, à une tolérance près, la cible changeait de couleur. Si la source restait dans le volume de tolérance pendant 0.5 secondes, alors l'essai était considéré comme réussi.

7.5.3 Procédure

16 sujets (11 hommes, 5 femmes), ont réalisé cette expérience. Aucun d'entre eux n'avait d'expérience avec une interface d'action à 6 ddls. Tous étaient des étudiants entre 20 et 25 ans. Après une démonstration très courte, il était demandé aux sujets de réaliser l'expérience pendant un peu moins d'une demi-heure, avec chacune des interfaces d'action. Afin d'éviter l'effet d'ordre, 8 sujets ont commencé l'expérience avec le CAT alors que les huit autres ont commencé avec la spacemouse. Toutes les 5 minutes avait lieu un test, ce qui impliquait 5 tests par sujet et par interface au bout de l'expérience. Un test consistait en 8 essais où la cible apparaissait aléatoirement dans une des 8 positions et orientations prédéterminées. La position et l'orientation de la cible pendant les essais non mesurés étaient totalement aléatoires.

7.5.4 Résultats

Pour chaque test, nous avons fait la moyenne des huit essais pour le temps de réalisation, les mesures de coordination et le taux d'erreur. Nous avons mesuré l'inefficacité dans l'espace des translations (I^{trans}), des rotations (I^{rot}) et dans l'espace translations-rotations ($I^{trans-rot}$). Nous avons fait une analyse statistique de ces résultats au moyen du test t de student, avec un taux de signification $p = 0.05$. Nous obtenons les résultats résumés dans le tableau 4.

Tableau 4: Comparaison des résultats pour une tâche de positionnement 3D

| | Temps | | I^{trans} | | I^{rot} | | $I^{trans-rot}$ | | Erreur | |
|----|--------------------|-------|-------------------------------------|------|----------------------|------|---------------------|------|---------------------|-----|
| | CAT | Sp. | CAT | Sp. | CAT | Sp. | CAT | Sp. | CAT | Sp. |
| T1 | 12.60 | 11.62 | 1.94 | 2.81 | 2.64 | 3.09 | 2.79 | 3.13 | .22 | .41 |
| | $t(15) = .652; NS$ | | $t(15) = 3.176; \mathbf{p} = .006$ | | $t(15) = 1.607; NS$ | | $t(15) = 1.135; NS$ | | $t(15) = 1.858; NS$ | |
| T2 | 9.62 | 9.69 | 1.39 | 2.14 | 2.43 | 2.56 | 2.55 | 2.58 | .39 | .34 |
| | $t(15) = .052; NS$ | | $t(15) = -2.46; \mathbf{p} = .027$ | | $t(15) = -1.752; NS$ | | $t(15) = -.092; NS$ | | $t(15) = -.574; NS$ | |
| T3 | 8.02 | 7.64 | 1.06 | 1.62 | 2.19 | 1.98 | 2.29 | 2.00 | .37 | .39 |
| | $t(15) = .364; NS$ | | $t(15) = -3.055; \mathbf{p} = .008$ | | $t(15) = 1.181; NS$ | | $t(15) = 1.689; NS$ | | $t(15) = .312; NS$ | |
| T4 | 6.64 | 6.16 | .70 | 1.27 | 2.13 | 1.85 | 2.22 | 1.87 | .37 | .42 |
| | $t(15) = .591; NS$ | | $t(15) = -3.912; \mathbf{p} = .001$ | | $t(15) = .955; NS$ | | $t(15) = 1.178; NS$ | | $t(15) = .531; NS$ | |
| T5 | 5.67 | 5.21 | .73 | .93 | 1.85 | 1.80 | 1.94 | 1.79 | .39 | .33 |
| | $t(15) = .654; NS$ | | $t(15) = -1.502; p = .153NS$ | | $t(15) = .198; NS$ | | $t(15) = .51; NS$ | | $t(15) = .723; NS$ | |

Les sujets ont les mêmes temps de réalisation avec le CAT qu’avec la spacemouse. Nous pensons que les temps de réalisation avec le CAT ne sont pas plus brefs qu’avec la spacemouse pour deux raisons principales.

Tout d’abord, l’espace des orientations pour la chaise cible a été étendu par rapport à l’expérience précédente. Or, comme nous l’avons déjà noté, la structure actuelle du CAT, à base d’axes emboîtés, rend certaines rotations difficiles à réaliser. Par conséquent, durant l’expérimentation de manipulation 3D, certains essais ont nécessité un peu plus de temps, ce qui a pénalisé les moyennes des tests effectués. La possibilité d’appliquer une rotation au plateau du CAT, sans aucune limitation, est un critère principal que nous allons prendre en compte pour le développement de la nouvelle version de notre interface d’action.

Par ailleurs, le CAT utilise deux modes de résistance différents pour le contrôle des translations et des rotations. Nous avons montré que cette caractéristique offrait de nombreux avantages pour l’interaction 3D. Par contre, ce découplage ne semble pas favoriser les temps de réalisation pour une tâche de manipulation précise d’un objet 3D au moyen de 6 ddls.

Les sujets ont effectué des mouvements plus coordonnés en translation avec le CAT qu’avec la spacemouse. La figure 37 illustre les résultats obtenus. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que le design du CAT permet d’appliquer une force dans une direction précise, sans appliquer la moindre force dans des directions non souhaitées. Par exemple, il est possible d’effectuer des translations dans le plan X-Y sans effectuer de translations selon l’axe Z. Par conséquent, le CAT permet d’éviter les translations non souhaitées, et ainsi autorise des mouvements plus coordonnés.

Zhai et Milgram ont montré que les utilisateurs d’interfaces élastiques associées à un contrôle de vitesse avaient des mouvements de trajectoires plus coordonnés que les utilisateurs d’interfaces isotoniques associées à un contrôle de position. Comme nous avons montré que les mouvements en translation issus du CAT étaient plus coordonnés que ceux issus de la spacemouse, on peut faire l’hypothèse que le CAT peut être utilisé de manière plus efficace qu’une interface isotonique pour la translation d’objets 3D.

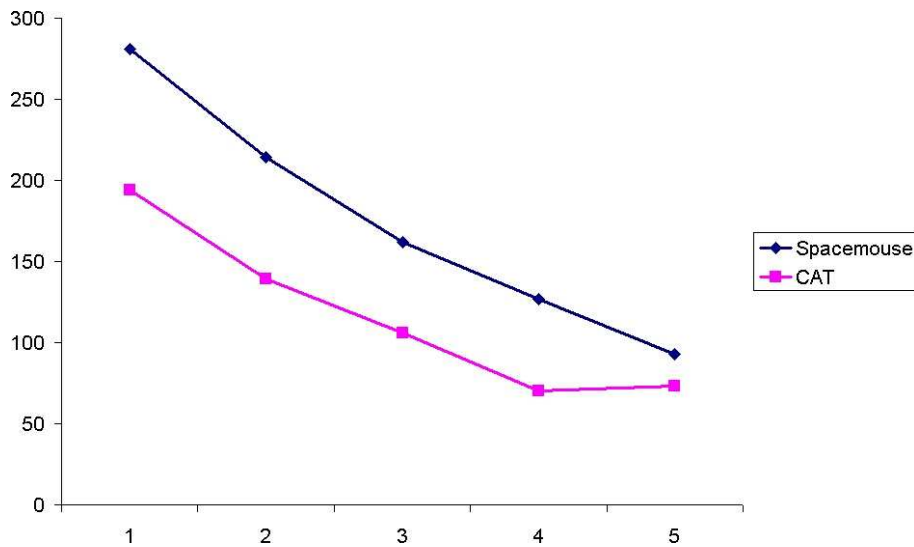


Figure 37: Moyennes d'inefficacité (%)

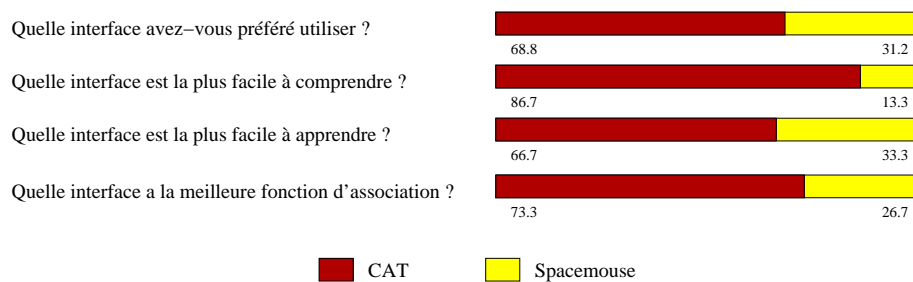


Figure 38: Préférences utilisateurs

Les sujets effectuent des rotations aussi coordonnées avec les deux interfaces. Pourtant, étant donné que les rotations avec le CAT sont effectuées à travers un mode de résistance isotonique associé à un contrôle de position, on aurait pu s'attendre à une coordination moins bonne de la part du CAT. Nous pensons que si nous obtenons des résultats comparables, c'est en partie grâce au fait que la coordination des rotations du CAT est indépendante de la coordination des articulations humaines. De plus, de manière similaire aux translations, il est possible d'appliquer une rotation autour d'un axe donné sans appliquer de rotations parasites autour d'axes secondaires.

Finalement, l'expérience a montré que les deux interfaces étaient aussi performantes dans l'espace translation-rotation. Les taux d'erreurs comparables permettent de conclure que le CAT est aussi précis qu'une spacemouse pour une tâche de manipulation d'objets 3D.

7.5.5 Préférences utilisateurs

Après l'expérience, nous avons demandé aux sujets de répondre à un questionnaire pour connaître leur sentiment vis-à-vis des interfaces d'action qu'ils venaient d'utiliser. Pour chaque question, il a été demandé aux sujets de signifier l'interface qu'ils ont préféré. La figure 38 illustre les résultats obtenus.

68,8 % des sujets ont préféré utiliser le CAT que la spacemouse. Ils ont trouvé que le fonctionnement du CAT était plus facile à comprendre que celui de la spacemouse à 86,7 %. Le CAT a été perçu d'apprentissage plus facile à 66,7 % et 73,3 % des sujets ont trouvé que la correspondance entre les mouvements dans l'EV et les mouvements appliqués sur l'interface était meilleure avec le CAT qu'avec la spacemouse.

7.6 Conclusion

Les expérimentations décrites ci-dessus ont contribué à l'évaluation du CAT. Elles ont permis de montrer :

- que la gestion de la profondeur n'influait pas les performances des utilisateurs pour une tâche de sélection 2D,
- que la correspondance entre l'orientation du plateau et celle de l'objet manipulé améliorait les performances des utilisateurs,
- que les performances de la version actuelle du CAT étaient équivalentes à celles d'une spacemouse pour une tâche précise de manipulation 3D,
- et que ces performances étaient meilleures pour une tâche d'orientation d'un objet.

Notre objectif, dans un premier temps, était de valider le concept du CAT. Aussi, nous avons mené un premier ensemble d'expérimentations pour étudier la validité des principes de base de cette nouvelle interface d'action. Actuellement, nous sommes en train de concevoir une nouvelle version du CAT pour réaliser une étude de faisabilité d'une éventuelle diffusion du produit. Cette étude inclue bien évidemment une batterie de tests plus importants sur cette nouvelle version mais sort du cadre de cette thèse.

Plusieurs expérimentations devront être menées avec la future version du CAT, à deux niveaux différents. Au niveau sensori-moteur, il pourra être intéressant d'évaluer des aspects physiques du CAT. Par exemple nous pouvons imaginer une expérimentation ayant pour but de mesurer la capacité des utilisateurs à appliquer une force sur le dynamomètre dans une direction donnée en fonction des orientations du plateau du CAT. Au niveau mental, nous devons nous assurer que les métaphores que nous proposons sont bien assimilées. Par exemple, nous pourrions évaluer les différences de performance des utilisateurs pour une tâche de déplacement dans un tunnel 3D au moyen des métaphores que nous proposons d'une part, et des métaphores implémentées au moyen de techniques d'interaction associées à d'autres interfaces d'action d'autre part. Parmi ces autres interfaces d'actions, nous pensons aux interfaces 3D isométriques mais aussi aux interfaces 3D isotoniques.

Il est à noter que le CAT est actuellement utilisé par Florence Tyndiuk du Laboratoire de Sciences Cognitives de l'université Bordeaux 2 dans le cadre d'une étude ayant pour but de mettre en évidence les rapports entre les aptitudes cognitives des utilisateurs (capacités spatiales, attention, mémoire ...) et les performances de ces derniers lors de tâches d'interaction 3D [TTSC03]. Ces tâches concernent la manipulation d'objets, la recherche de cible et le déplacement dans un labyrinthe 3D.

Au-delà d'expérimentations formelles, l'utilisation d'une nouvelle interface au sein d'applications concrètes, peut contribuer à l'évaluation de cette interface. Cela permet de se rendre

compte de ce qu'il est possible et de ce qu'il n'est pas possible de faire avec l'interface considérée. Dans le chapitre suivant, nous présentons des applications concrètes dans lesquelles l'utilisation du CAT est bénéfique.

Chapitre 8

Applications

Dans ce chapitre, nous présentons trois applications concrètes dans lesquelles le CAT est utilisé. Ces applications concernent la visualisation et la manipulation de scènes 3D, le géomarketing, et le théâtre interactif. De plus, nous présentons un ensemble d'applications potentielles dans lesquelles l'utilisation du CAT pourrait être bénéfique.

8.1 CatViewer

Le CatViewer est un outil de visualisation et de manipulation de scènes 3D pour les IVC. Alors que les outils de visualisation et de manipulation de scènes 3D classiques se basent sur l'utilisation d'une souris pour l'interaction, le CatViewer utilise les informations provenant du CAT pour fonctionner. L'objectif du CatViewer est de permettre une interaction rapide et efficace avec des scènes 3D quelconques, tout en assurant une bonne immersion des utilisateurs. Le CatViewer a été développé avec OpenSG. Par défaut, le CatViewer charge le modèle passé en ligne de commande et l'attache aux mouvements du CAT à travers la métaphore du trackball. Le CatViewer rassemble un ensemble de fonctionnalités générales pour l'interaction avec des EV. A l'instar de Perfly pour Performer, le CatViewer peut être utilisé comme base pour le développement d'applications spécifiques.

8.1.1 Contrôle du système

Les changements de mode et le contrôle des paramètres dans le CatViewer se font à travers des menus 2D affichés dans l'espace 3D au moyen de la métaphore de l'écran virtuel. L'affichage d'un menu est invoqué par l'intermédiaire du clic-droit à partir du stylet ou de la souris située sur le côté du CAT. Ce même mécanisme est utilisé pour faire passer le curseur d'un menu à un autre, lorsque plusieurs menus sont utilisés simultanément. La figure 39 montre deux des menus du CatViewer utilisés simultanément. A l'instar des systèmes de fenêtrage classiques, chaque écran virtuel peut être fermé ou déplacé dans l'espace. Le CatViewer permet un contrôle du système immersif car les menus font partie de l'EV. Le CatViewer permet un contrôle du système efficace car les utilisateurs agissent au moyen d'un stylet qu'ils déplacent sur une surface physique.

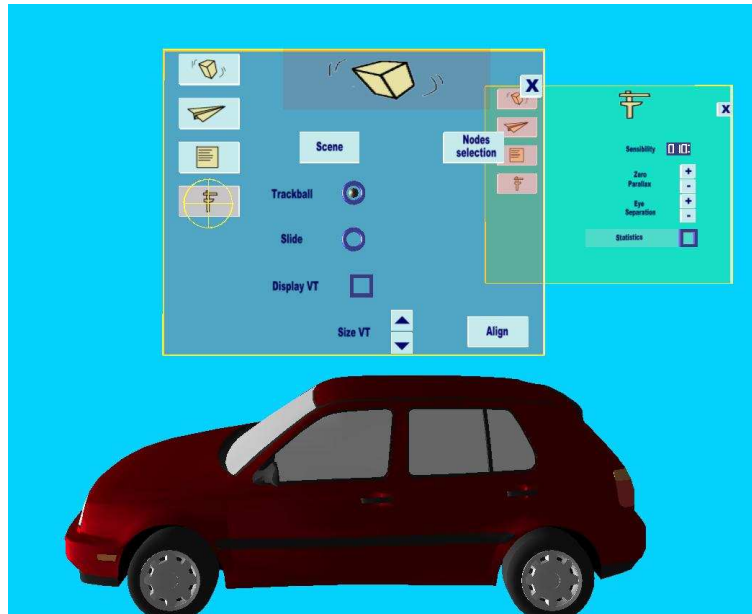


Figure 39: Deux menus du CatViewer

8.1.2 Sélection d'objets

Le processus de sélection d'objets se fait à travers un écran virtuel de sélection (figure 40). Cet écran est constitué d'une zone de sélection et d'un ensemble de boutons. La zone de sélection permet de pointer les objets à sélectionner. Les boutons, situés sur le côté de l'écran virtuel permettent de gérer les options de sélection : remonter dans l'arborescence, ajouter à la liste de sélection, supprimer de la liste de sélection. Les objets sélectionnés sont mis en évidence à travers l'affichage de leur boîte englobante.

8.1.3 Manipulation

Les objets sélectionnés peuvent être manipulés à travers plusieurs techniques d'interaction. Ces techniques sont la technique du *trackball*, la technique du *trackball ciblé* ou la technique du *glissement* décrites précédemment. En fonction de ce qu'ils veulent faire, les utilisateurs choisiront une de ces techniques. Par exemple, la technique du *trackball* sera utilisée pour observer un objet sous tous les angles alors que la technique du *glissement* va plutôt servir à positionner rapidement un objet en un endroit précis de la scène. Une fonction de mise en correspondance automatique permet d'orienter les objets sélectionnés selon l'orientation du plateau du CAT.

8.1.4 Navigation

Le CatViewer intègre différents modes de navigation pour permettre aux utilisateurs de se déplacer à l'intérieur des EV visualisés. Les modes "3D" correspondent aux techniques du *globe-oculaire-dans-la-main* et du *contrôle de véhicule*. Des techniques "2D" permettent de déplacer automatiquement le point de vue jusqu'à des endroits de l'EV. Ces endroits peuvent correspondre à des points sélectionnés sur le plateau virtuel. Ils peuvent aussi se situer face à des objets sélectionnés par la technique de *sélection-à-travers*. Finalement, les utilisateurs

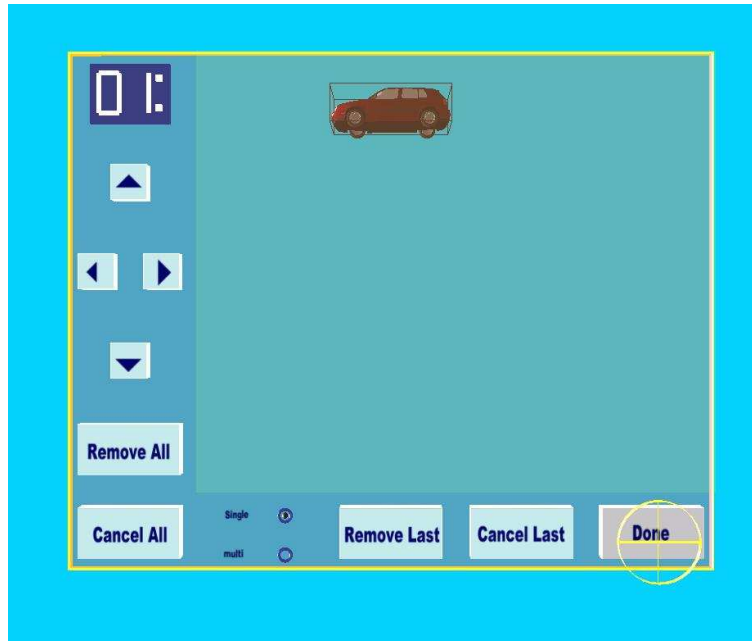


Figure 40: Ecran virtuel de sélection

peuvent déplacer le point de vue le long d'une trajectoire définie par un ensemble de points de contrôle. Ces points de contrôle sont positionnés de manière rapide et précise dans l'espace 3D au moyen de la métaphore du plateau virtuel.

8.1.5 Edition et paramètres

A travers un menu spécifique, les utilisateurs ont la possibilité d'éditer les objets sélectionnés. Pour le moment, cette édition se résume à la suppression des objets. Ils peuvent aussi éditer des formes géométriques simples (cubes, sphères, tores). Un autre menu permet de régler des paramètres généraux. Ces paramètres concernent la gestion de la vision stéréoscopique ou la sensibilité du CAT.

8.1.6 Extensions

Un certain nombre de fonctionnalités, non encore implémentées, peuvent (doivent) être intégrées au CatViewer. Par exemple, nous envisageons d'intégrer des outils d'édition de couleurs, de matériaux et de textures.

La principale limitation du CatViewer réside dans son interface graphique réduite pour le contrôle du système. Par exemple, il n'est actuellement pas possible de se déplacer dans l'arborescence de fichiers du système pour le chargement ou la sauvegarde de modèles 3D. Nous envisageons donc de remplacer notre embryon d'interface graphique par une interface plus aboutie, comme KRDL [SN97] par exemple.

Finalement, nous souhaitons intégrer un module de reconnaissance d'écriture dans le CatViewer, pour profiter de la tablette et du stylet pour la saisie de texte.

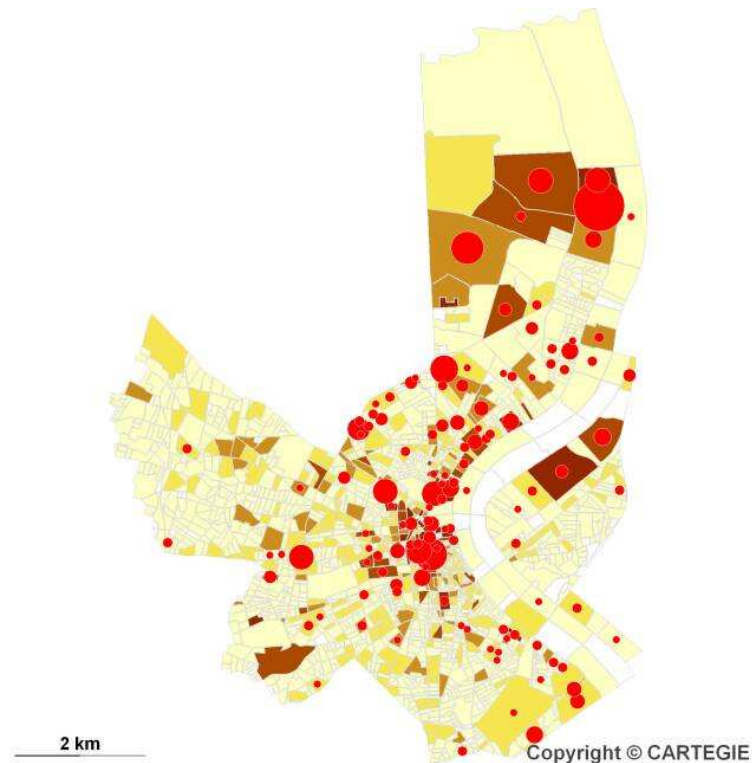


Figure 41: Représentation d'informations dans une application de géomarketing 2D

8.2 Géomarketing 3D

Dans cette section, nous prenons l'exemple du géomarketing comme contexte réel pour le développement d'une application 3D interactive visualisée au moyen d'une IVC.

8.2.1 Le géomarketing

Le géomarketing regroupe les outils d'aide à la décision qui utilisent des représentations d'informations abstraites (eg. données économiques, démographiques) sur des supports géographiques. Par exemple, lors du choix de l'implantation d'un nouveau restaurant, les décideurs vont chercher à visualiser des informations comme la localisation des restaurants existants, les voies de communications ou encore le potentiel d'achat des habitants des différents secteurs. La plupart des applications de géomarketing existantes sont des applications 2D. La représentation des données se fait principalement à travers l'affichage de zones colorées, comme illustré sur la figure 41.

L'utilisation d'applications 3D interactives offre de nouvelles possibilités pour le géomarketing [HG01]. Tout d'abord, la troisième dimension procure un espace de représentation plus grand pour les données abstraites. Ensuite, l'utilisation de modèle 3D permet une nouvelle appréhension des données. Par exemple, dans le cas du restaurant, il va être possible de descendre au niveau de la rue pour se rendre compte du panorama offert par tel ou tel bâtiment. De même, les décideurs pourront se mettre à l'intérieur d'un véhicule de transport en commun pour vérifier si le restaurant est bien visible lors du parcours de ce véhicule. En collaboration

avec un cabinet de géomarketing, Cartégie [Car], nous avons exploré les potentialités liées à l'utilisation d'EV pour le géomarketing, sur des PC standards [HG01].

L'utilisation d'IVC pour le géomarketing peut être bénéfique à partir du moment où l'objectif des applications de géomarketing est de fournir des outils d'aide à la prise de décision. De plus l'utilisation d'une visualisation stéréoscopique qui améliore la perception de la profondeur peut favoriser le processus de compréhension des données. Finalement, on se retrouve dans une situation où des utilisateurs sont immergés dans des EV avec lesquels ils peuvent interagir. Malgré les potentialités que laisse entrevoir une telle approche, les outils du géomarketing restent généralement au niveau d'applications 2D visualisées sur des écrans standards. Nous pensons que l'utilisation réduite d'applications 3D interactives affichées au moyen d'IVC pour le géomarketing est en partie due au problème de l'interaction avec les EV.

8.2.2 Modélisation des EV

Les territoires généralement étudiés par les décideurs de géomarketing sont des environnements urbains. La modélisation de ces environnements doit respecter plusieurs contraintes liées au Géomarketing. Tout d'abord, la modélisation doit être automatique et générique pour permettre des mises à jour fréquentes en fonction des modifications de la base de données. Ensuite, chaque bâtiment doit être identifié et géo-référencé pour permettre le croisement avec les données stratégiques.

Pour satisfaire à ces contraintes, nous avons développé un ensemble de fonctionnalités permettant la génération automatique d'environnements urbains à partir du cadastre des villes. En partant du principe qu'une représentation fidèle de chaque bâtiment n'est pas nécessaire dans un contexte de géomarketing, nous avons orienté notre approche vers une méthode de construction favorisant une reconnaissance globale de la ville. En accord avec le modèle de Lynch [Lyn60], nous cherchons à renforcer la cohérence des rues en orientant tous les toits d'une rue dans le même sens. De même, nous remplaçons les bâtiments servant de point de référence par des modèles spécifiques reconnaissables. Les modèles générés sont organisés en graphe de scène hiérarchisés (ville / districts / quartiers / ilots / bâtiments).

Afin d'obtenir des modèles les plus légers possibles, nous avons cherché à simplifier au maximum les bâtiments que nous générons. Pour cela, nous avons fait la remarque suivante. Les bâtiments d'un environnement urbain dense ont, en général, une façade unique côté rue et un ensemble de façades du côté de l'intérieur des pâtés de maison. En partant du principe que, à part quelques pilotes d'hélicoptères, personne ne connaissait l'intérieur des pâtés de maisons, nous avons choisi de redéfinir la surface au sol des bâtiments à partir de leur seule façade sur la rue. Un ensemble d'heuristiques nous permet d'obtenir un quadrilatère pour la surface au sol de ces bâtiments. De cette manière, nous obtenons un grand nombre de bâtiments qui peuvent être modélisés avec un minimum de facettes (quatre pour les façades et deux pour le toit).

Au niveau de l'aspect des différents bâtiments, nous utilisons un jeu de textures contenu dans une base de données organisée en terme de hauteur et largeur de bâtiments, comme illustré en figure 42. Le remplacement des textures de la base de données implique une modification

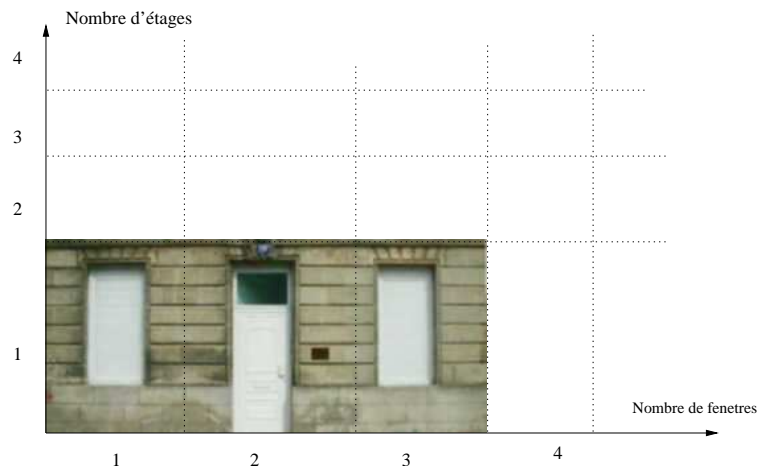


Figure 42: Organisation de la base de données des textures

de l'ambiance de la ville (figure 43). Les techniques de génération d'environnements urbains que nous avons développées permettent d'obtenir des modèles 3D de grandes dimensions, visuellement satisfaisants, dans lesquels chaque bâtiment est modélisé avec un minimum de facettes pour une interaction temps-réel. La figure 44 montre deux vues d'un modèle construit à partir du cadastre de Bordeaux. Dans les modèles que nous générons, chaque bâtiment est géo-référencé et possède un identifiant unique. Cela permet de coupler des informations stratégiques aux modèles urbains.

8.2.3 Visualisation d'informations abstraites

Alors qu'il existe un certain nombre de représentations 2D standards (eg. graphes, histogrammes), l'espace de représentation 3D reste encore à explorer. Certains types de représentations ont été proposés pour des applications 3D interactives. Par exemple, Healey se base sur le processus pré-attentionnel pour la représentation d'informations à travers des Pexels (éléments de perception) [HE98]. Ware répertorie les principes fondamentaux de la visualisation d'informations dans [War00]. Nous présentons quelques exemples de représentations très simples à travers les figures 45 et 46. La figure 47 utilise une représentation symbolique pour la localisation des pharmacies.

L'utilisation de modèles de représentation 3D ne peut être efficace que si les utilisateurs ont la possibilité de manipuler facilement et rapidement les données qu'ils sont en train de visualiser. Par exemple, dans le cas simple des cylindres colorés, il ne sera possible d'appréhender les tailles relatives des différents cylindres que si la scène peut être observée rapidement sous différents angles de vue. Par conséquent, nous pensons que le succès des représentations 3D dans les applications interactives est fortement lié aux interfaces d'actions utilisées pour l'interaction.



Figure 43: Modification de l'ambiance de la ville en fonction de la base de données de textures choisie

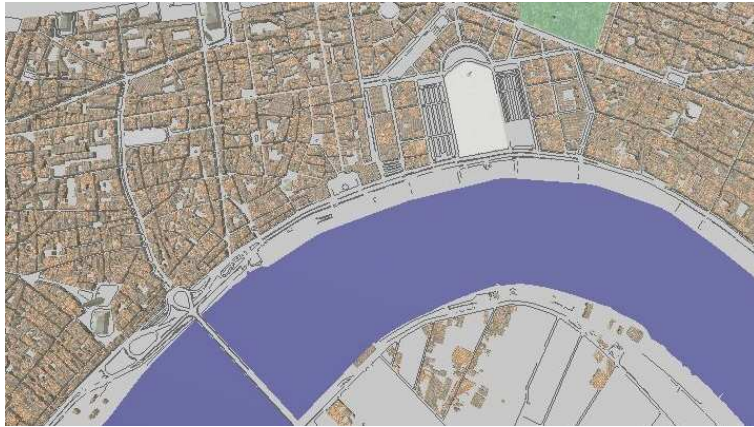


Figure 44: Vues du modèle de Bordeaux

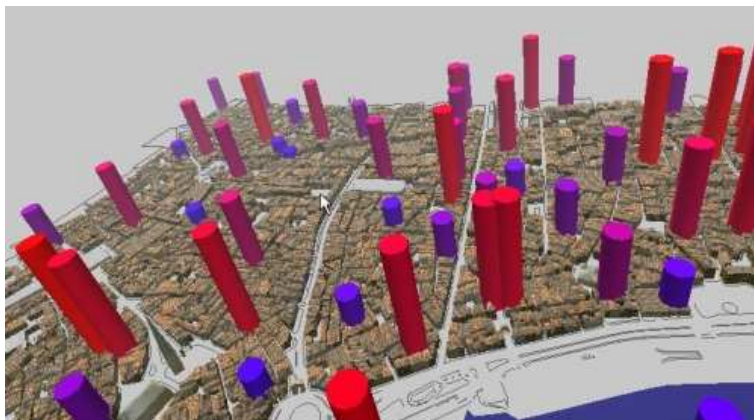


Figure 45: Exemple de représentation de données en 3D

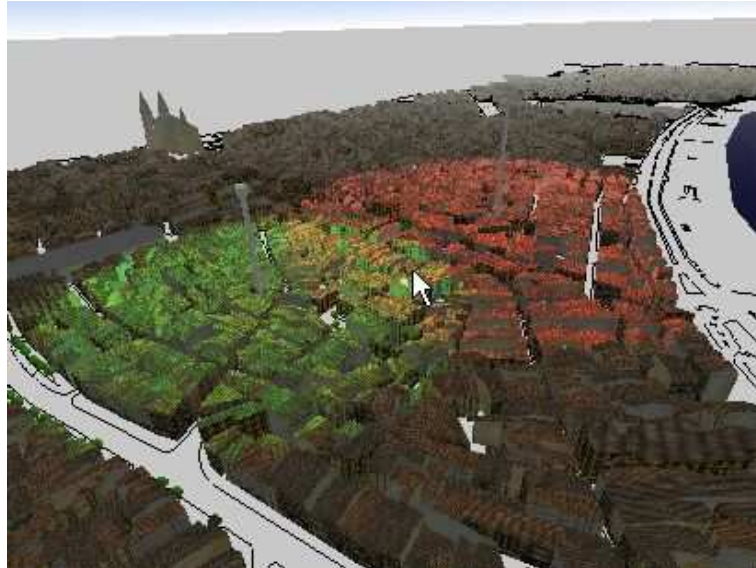


Figure 46: Utilisation de spots lumineux pour la visualisation de zones d'influence de deux commerces



Figure 47: Localisation des pharmacies

8.2.4 Interaction

Nous avons utilisé le CatViewer pour le développement d'une application collective de géomarketing 3D immersif. Toutes les fonctionnalités du CatViewer sont disponibles pour l'interaction avec la scène 3D. Des fonctionnalités propres au géomarketing peuvent être ajoutées. Ces fonctionnalités peuvent être accessibles à travers des menus *métiers*, hérités des menus standards du CatViewer. Dans la suite, nous présentons un aperçu d'une application de géomarketing à travers un scénario fictif d'utilisation.

Une dizaine de décideurs se sont réunis pour choisir le lieu d'implantation d'un nouveau restaurant exotique dans la ville de Bordeaux. Aucun d'eux n'est expert 3D. Une représentation de la ville flotte devant eux, sur plusieurs mètres de largeur. Le CAT est situé face à l'écran.

Un des utilisateurs se saisit du CAT et fait tourner le plateau autour de son axe vertical, impliquant la rotation du modèle autour de son axe vertical. Puis, il saisit le stylet et appuie sur le bouton 2 pour faire apparaître un menu affiché sur un écran virtuel face à lui. En cliquant sur le bouton "métier" il fait apparaître un deuxième menu qu'il déplace sur le côté de la scène. Sur ce nouveau menu, il sélectionne l'option "afficher les restaurants". Des pointeurs 3D apparaissent alors dans la scène, aux endroits où sont localisés les restaurants existants.

En cliquant sur le bouton 2, l'utilisateur fait passer son curseur sur le premier menu et sélectionne le mode "trackball ciblé". Ce mode lui permet de modifier le pivot du trackball à l'aide du plateau virtuel. Un deuxième utilisateur se saisit du CAT et positionne le plateau virtuel au niveau d'une zone pauvre en restaurants. La scène tourne maintenant autour de cette zone.

Sur le menu métier, le décideur choisit l'option "information". Un écran virtuel apparaît alors devant la scène. En sélectionnant des pointeurs à travers cet écran, il fait apparaître des informations relatives aux restaurants concernés. Après s'être assuré qu'il n'existait pas de restaurants exotiques, les décideurs choisissent d'étudier les possibilités d'implantation de leur restaurant dans cette zone.

Pour cela, un troisième utilisateur charge un modèle 3D de restaurant et le fait glisser jusqu'à un terrain vierge à l'aide de la métaphore du plateau virtuel. Il sélectionne ensuite ce nouveau bâtiment pour que le point de vue vienne se positionner automatiquement juste au-dessus. A l'aide de la technique du globe-oculaire-dans-la-main, les décideurs regardent alors l'environnement 3D à partir du restaurant implanté. En passant en mode contrôle de véhicule, ils naviguent dans les rues adjacentes pour se rendre compte de l'accessibilité de leur nouveau restaurant.

A travers ce scénario simpliste, nous avons montré comment quelques techniques d'interaction pouvaient être utilisées par des décideurs dans une application de géomarketing 3D. Nous pensons que des scénarios plus complexes pourraient être réalisés sans trop de difficultés par des utilisateurs novices. Le CAT permet de réaliser de nombreuses tâches d'interaction. Nous pensons que cette nouvelle interface peut contribuer au développement d'applications 3D interactives affichées au moyen d'IVC, au sein des entreprises.



Figure 48: Utilisation d'un EV comme décor de théâtre

8.3 Théâtre interactif

En collaboration avec une compagnie de théâtre, le *Théâtre du chapeau* [tdc] nous avons exploré les potentialités liées à l'utilisation d'EV affichés au moyen d'IVC pour "les nouveaux clowns", ou clowns de Théâtre [HG03]. Ce travail est basé sur la similarité de nos deux approches.

Le théâtre cherche souvent à transporter les spectateurs dans des lieux et/ou des périodes différentes. Pour cela, des décors ont pour but de favoriser l'immersion des spectateurs. De plus, le travail des nouveaux clowns est basé sur l'échange avec l'environnement qui les entoure. Par conséquent, l'interaction est une composante forte de ce type de théâtre.

Parallèlement à cette approche, l'utilisation d'IVC a pour but de favoriser l'immersion des utilisateurs dans des EV. Une grande partie de nos recherches concerne le développement d'interfaces pour l'interaction avec des EV.

La similarité de ces deux approches nous a amenés à la création d'une performance expérimentale. Le décor classique de théâtre est remplacé par des EV affichés avec une IVC, comme illustré sur la figure 48. Les clowns et l'audience, peuvent interagir avec ces EV en temps-réel.

Cette rencontre entre art et science est bénéfique pour les différentes parties. Elle offre une nouvelle dimension au théâtre et favorise les sources d'improvisation pour les clowns. Elle permet d'extraire les techniques de la réalité virtuelle du contexte scientifique et industriel, ce qui contribue à l'acceptation de ces techniques dans des contextes plus proches des préoccupations du grand public. Finalement, elle permet au public de vivre de nouvelles expériences. Les membres du public ne sont plus des spectateurs qui assistent à une représentation. Ils deviennent des acteurs qui participent à une expérience immersive.

Parmi les travaux connexes à notre approche, nous pouvons citer l'utilisation de poupées virtuelles pour des spectacles vivants [JJF01], ou les créations réalisées à l'Institut pour l'Exploration des Réalités Virtuelles [EVR]. De leur côté, Mackay et al. explorent les interactions qui peuvent exister entre des agents virtuels intelligents et des participants à travers le projet de théâtre interactif McPie [MHH01].

8.3.1 Le scénario

Même si les réactions du public font varier le déroulement de l'histoire d'une représentation à une autre, les performances des clowns s'organisent autour d'une trame de fond. Nous la décrivons brièvement ici.

Deux clowns entrent, découvrent le public et l'environnement. Ils décident de transformer la salle en vaisseau spatial, l'écran devenant le pare-brise. Les lumières s'éteignent, les moteurs font de plus en plus de bruit, le vaisseau décolle et atteint la vitesse de la lumière.

Le vaisseau arrive dans les faubourgs d'une ville. En fonction des demandes des utilisateurs, les clowns dirigent le vaisseau dans la ville afin d'explorer cette dernière. Les membres du public sont invités à piloter eux même le vaisseau. Progressivement, on peut reconnaître la ville de Bordeaux, mais sans aucun habitant. La question devient alors "où sont passés les Bordelais ?" .

Soudain, le clocher d'une église décolle. Les clowns décident de le suivre. Après un voyage dans l'espace, le vaisseau arrive sur une planète. Les clowns et le public décident d'explorer cette planète pour voir s'ils peuvent retrouver les Bordelais. Un des clowns s'équipe d'une combinaison spatiale et passe derrière l'écran. Un avatar correspondant apparaît alors sur la planète. L'autre clown demande alors au public de diriger le premier clown dans l'EV. Lorsque ce dernier s'approche de rochers, des actions ont lieu, comme par exemple l'apparition d'un monstre. Le clown revient alors dans l'environnement réel pour exprimer ce qu'il a vécu. Un membre du public est envoyé sur la planète à son tour. Puis le vaisseau repart pour aller explorer d'autres planètes.

8.3.2 Mise en œuvre

Le scénario décrit ci-dessus a servi de base pour des performances en public qui ont eut lieu à Hemicyclia. L'application a été développée avec OpenGL Performer. La ville de Bordeaux a été générée au moyen des techniques décrites dans le chapitre géomarketing 3D.

Pour la navigation dans les EV, nous avons initialement utilisé une spacemouse pour permettre aux acteurs et au public de contrôler des trajectoires fluides et complexes dans un espace 3D. Plusieurs inconvénients ont été notés lors de l'utilisation de cette interface d'action.

Tout d'abord, des jours d'entraînement ont été nécessaires avant que les acteurs n'arrivent à se servir de la spacemouse efficacement.

Deuxièmement, des contraintes logicielles ont dû être introduites en fonction des différentes tâches effectuées. Par exemple, les ddls de la spacemouse étaient filtrés pour permettre aux utilisateurs de rester au niveau du sol lors de la navigation dans la ville. Pour voler au-dessus



Figure 49: Utilisation du CAT pour la navigation

de la ville, les utilisateurs devaient cliquer sur un bouton pour que les signaux de la spacemouse soient interprétés différemment.

Parce que les acteurs avaient des difficultés pour atterrir, un autre bouton était consacré à l'activation d'un procédé d'atterrissage automatique.

Finalement, un troisième bouton était utilisé pour ré-initialiser la scène, étant donné que les utilisateurs avaient tendance à perdre cette dernière.

Dès lors que le prototype du CAT a été opérationnel, nous avons remplacé la spacemouse par ce dernier (figure 49). Nous avons associé un contrôle de vitesse à l'axe Yaw, et un contrôle de position aux deux autres axes de rotation. Nous effectuons les rotations dans le repère caméra.

Peu de temps a été nécessaire avant que les acteurs n'arrivent à utiliser le CAT pour le contrôle efficace de trajectoires 3D. Grâce à l'aspect séparable des ddls du CAT, les acteurs peuvent naviguer au niveau du sol, puis voler au-dessus de la ville et revenir se poser, sans que des contraintes logicielles ne soient ajoutées.

Les acteurs ne perdent plus la scène grâce au retour utilisateur fourni par l'orientation du plateau du CAT.

La structure auto-supportée du CAT permet aux acteurs de rester très indépendants vis-à-vis de l'interface : ils peuvent contrôler une trajectoire, s'arrêter en plein milieu pour jouer face au public, puis revenir prendre le contrôle du CAT sans qu'aucune modification n'ait eu lieu dans l'EV.

Pour diriger les clowns virtuels sur la planète, nous avons utilisé des pointeurs lasers (figure 50). L'intérêt de cette approche est de permettre au public de pointer directement vers des zones de l'écran, à travers des interfaces d'action très simples. Par contre, une telle approche nécessite que les zones pointées correspondent à des objets de la scène. En effet, il n'est pas possible d'utiliser un pointeur laser pour pointer vers une zone vide de l'espace. Par ailleurs,



Figure 50: Utilisation de pointeurs laser pour la sélection de cibles

une approche à base d'un déplacement d'un curseur sur l'écran n'est possible que si le mode de visualisation utilisé est monoscopique.

8.4 Applications potentielles

Nous venons de décrire trois applications dans lesquelles le CAT est utilisé. Nous proposons maintenant quelques pistes pour des utilisations futures du CAT.

8.4.1 Applications volumiques

Les applications volumiques ont pour but l'exploitation d'objets décrits en terme de volumes, et non en terme de surfaces comme c'est le cas dans la majorité des applications 3D interactives. Les applications volumiques sont utilisées dans différents domaines, notamment en médecine où les praticiens ont besoin d'observer et de manipuler l'intérieur des organes.

Nous pensons que le CAT peut être bénéfique au niveau de la visualisation des données volumiques. En effet, le plateau que les utilisateurs tiennent dans leurs mains permet de déplacer un plan de coupe à l'intérieur des volumes de données. Ce plan de coupe permet une visualisation des données à travers des tranches 2D.

Au niveau de la sélection ou de la manipulation de données volumiques, la métaphore du plateau virtuel laisse entrevoir de nombreuses techniques d'interaction pour les applications volumiques, la structure auto-portée du CAT et la présence d'un support physique pour le stylet permettant le déplacement précis d'un curseur dans un espace 3D.

Hinckley et al. utilisent des outils (une tête de poupée est une plaque de plexiglas), pour visualiser et manipuler des données neurochirurgicales [HPGK94]. Le déplacement d'un plan 2D dans les données leur permet de mesurer des distances ou de définir des trajectoires

chirurgicales. Le CAT pourrait être utilisé en remplacement des interfaces d'actions utilisées avec cette application. Dans ce cas, le CAT aurait pour avantages :

- de réduire la fatigue liée à la manipulation des interfaces d'action,
- de favoriser le partage des interfaces pour les sessions collectives,
- d'améliorer la précision des mouvements dans l'EV en restant indépendant des tremblements des utilisateurs.

8.4.2 CAO

Un autre domaine dans lequel le CAT peut se révéler utile est celui de la CAO. En effet, les applications modernes de la CAO utilisent la 2D pour la modélisation précise des objets, et la 3D pour la visualisation et la manipulation des objets modélisés. Certains outils comme Catia Delmia [Cat], permettent même de se déplacer à l'intérieur des objets.

L'intérêt du CAT pour de telles applications est alors incontestable. Les utilisateurs vont pouvoir utiliser des techniques d'interaction 2D pour la modélisation. Ils pourront ensuite manipuler leurs objets de manière intuitive à travers le plateau du CAT. De même, la technique du glissement pourra être utilisée pour positionner des pièces 3D dans des assemblages. Pour cela, les utilisateurs n'auront qu'à orienter le plateau du CAT pour choisir le plan de translation, puis positionner rapidement les pièces à l'aide du stylet.

Les mécaniciens qui ont conçu la version actuelle du CAT ont tout de suite été convaincus par l'intérêt d'une telle interface. En effet, utilisateurs quotidiens d'outils de CAO, ils ont été séduits par le fait que le CAT donnait la possibilité de manipuler rapidement des pièces 3D.

Chapitre 9

Conclusion

9.1 Rappel du contexte

Les EV sont de plus en plus utilisés dans les applications modernes. Ces applications offrent des possibilités nouvelles dans de nombreux domaines d'activité tel que la conception, l'analyse de données ou encore le divertissement.

Les interfaces de perception les plus utilisées pour la visualisation de ces applications sont les moniteurs de bureau. Dans ce cas, malgré ses limitations pour la réalisation de tâches 3D, la souris reste l'interface d'action indétronable pour l'interaction avec les EV.

Des interfaces de perception immersives ont été proposées pour immerger un utilisateur dans un EV. C'est le cas notamment des visocasques ou des plans de travail immersifs. Pour ce type de visualisation, les interfaces d'action classiquement utilisées sont des gants et des interfaces isotoniques permettant de récupérer la position de la main de l'utilisateur.

Aujourd'hui, les IVC sont de plus en plus utilisées pour la visualisation d'EV. Ces interfaces permettent à plusieurs utilisateurs localisés en un lieu unique d'être immergés dans un même EV. Elles permettent donc l'utilisation d'applications collectives pour le travail de groupe.

Les caractéristiques propres des IVC ne permettent pas d'utiliser efficacement les interfaces d'action qui ont été conçues pour d'autres interfaces de perception. Des interfaces spécifiques ont été proposées pour l'interaction avec des IVC ; cependant, ces interfaces ne permettent généralement le contrôle que de 2 ddls, et ne sont donc pas adaptées à l'interaction avec des environnements 3D.

Le point de départ de cette thèse a été le constat qu'il n'existait pas d'interfaces d'action qui permettaient à plusieurs utilisateurs d'interagir efficacement avec des EV affichés au moyen d'IVC. Ce manque d'interfaces adaptées constitue un frein au développement d'applications collectives basées sur des EV affichés au moyen d'IVC.

9.2 Contributions

Nous avons identifié les principales caractéristiques des IVC pour l'interaction avec des EV. Ces caractéristiques sont la surface de visualisation de grande taille, l'espace de travail de grande taille, l'utilisation collective et le point de vue caméra partagé. A partir de ces

caractéristiques, nous avons proposé une liste de recommandations pour le développement d'interfaces adaptées aux IVC. Nous rappelons ici ces recommandations :

- Les interfaces d'action doivent être performantes pour de grands déplacements comme pour des déplacements fins.
- Les interfaces graphiques 2D en périphérie de l'écran sont à éviter.
- Les interfaces d'action fixes doivent être acquises facilement et si possible être persistantes.
- Les interfaces d'action mobiles ne doivent pas être contraignantes (sans fils, légères), et leur rayon de fonctionnement doit couvrir tout l'espace de travail.
- Les techniques d'interaction doivent être indépendantes du point de vue.
- La visualisation de l'environnement réel doit être prise en compte.
- Les interfaces d'action généraliste doivent être polyvalentes : tâches d'interaction différentes, espaces virtuels de tailles variables, visualisation exocentrée ou endocentrée, visualisation stéréoscopique ou non.

Nous avons ensuite proposé une nouvelle interface, le CAT, pour l'interaction avec des EV affichés au moyen d'IVC. Cette interface tire partie des avantages des interfaces d'action existantes, tout en rejetant leurs principales limitations, comme l'illustre la figure 51.

Nous avons développé un ensemble de techniques d'interaction 2D et de techniques d'interaction 3D pour la réalisation de tâches de contrôle du point de vue, de manipulation, de sélection et de contrôle du système.

Nous avons ensuite commencé l'évaluation formelle du CAT à travers trois expérimentations. Ces expérimentations ont permis de montrer que le contrôle d'un curseur dans un plan orienté dans l'espace pouvait être aussi efficace que le contrôle d'un curseur dans un plan vertical, que la correspondance entre l'orientation d'un objet manipulé et l'orientation du plateau du CAT améliorerait les performances des utilisateurs, et que le CAT était plus performant que la spacemouse pour des tâches d'orientation et de manipulation 3D.

Finalement, nous avons développé des applications concrètes dont le CatViewer, un outil de visualisation et de manipulation de scènes 3D, qui peut servir de base pour le développement d'applications spécifiques.

Nous pensons que ces contributions peuvent favoriser le développement d'applications basées sur des EV affichés au moyen d'IVC.

9.3 Perspectives

Le prototype actuel du CAT est opérationnel. Cependant, nous souhaitons faire évoluer ce prototype. Pour cela, nous allons nous adresser à des ergonomes et des designers industriels, pour le développement d'une version plus aboutie.

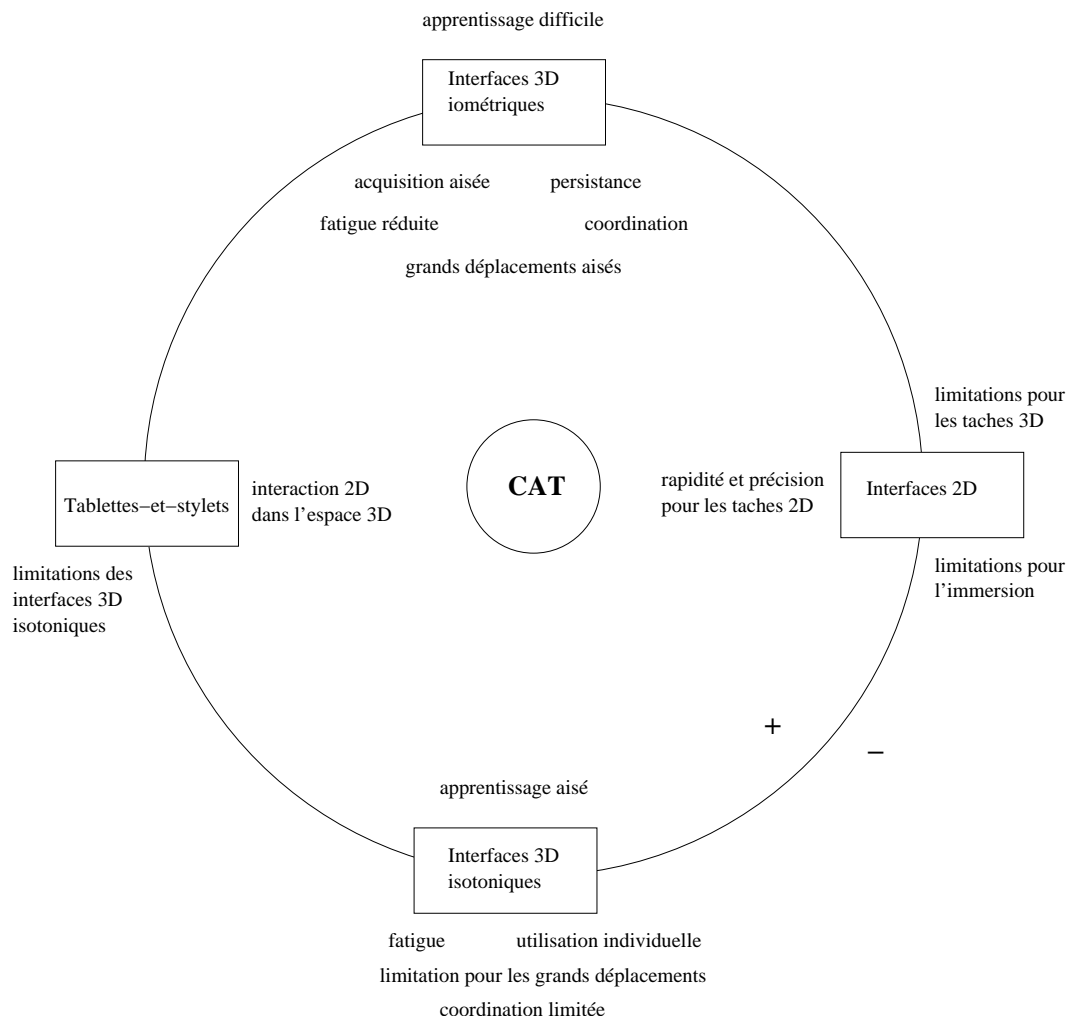


Figure 51: Positionnement du CAT par rapport aux principales interfaces d'action existantes

Nous allons poursuivre l'évaluation du CAT, notamment à travers des expérimentations ayant pour but de mesurer les différences de performance entre le CAT et d'autres interfaces d'action, pour des tâches de manipulation et des tâches de navigation.

Le CAT a initialement été développé pour répondre aux contraintes des IVC. Cependant, il n'est pas limité à ce type d'interfaces de perception. L'utilisation du CAT avec des visiocasques ou des plans de travail immersifs est à explorer. Des déclinaisons du CAT basées sur le principe d'un plateau amovible auto-supporté, peuvent être envisagées pour une adaptation aux différents type d'interfaces de perception utilisées.

Finalement, nous souhaitons intégrer le CAT au sein d'applications réelles complexes, en espérant que cette nouvelle interface fera évoluer de telles applications. En particulier, nous souhaitons interfacier une application réelle de CAO avec le CAT, pour permettre une utilisation collective et immersive de ce type d'application.

Les interfaces d'action 3D pour l'interaction avec des EV sont souvent réservées à des experts pour des applications limitées. Ces interfaces sont communément considérées par le grand public comme des outils plus proches de la science-fiction que de leurs préoccupations. A travers nos travaux, nous espérons rendre plus simple et plus accessible l'utilisation d'EV pour des applications de la vie de tous les jours.

Bibliographie

- [AFB02] C. Andújar, M. Fairén, and P. Brunet. Affordable immersive projection system for 3d interaction. In *First Ibero-American Symposium in Computer Graphics*, pages 83–89, 2002.
- [AR01] M. Ashdown and P. Robinson. The writing’s on the wall : Large, remotely controlled displays. In *Proceedings of the First European Conference on Computer-Supported Collaborative Learning 2001 (Euro-CSCL)*, pages 83–88, 2001.
- [ARZ03] J. Allard, B. Raffin, and F. Zara. Coupling parallel simulation and multi-display visualization on a pc cluster. In *Euro-par 2003*, 2003.
- [AZ96] M. Ayers and R. C. Zeleznik. The lego interface toolkit. In *Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '96)*, pages 97–98, 1996.
- [AZ97] J. Accot and S. Zhai. Beyond Fitts’ law : models for trajectory-based HCI tasks. In *Proceedings of ACM CHI’97 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 295–302, 1997.
- [BBC⁺02] L. Benini, M.E. Bonfigli, L. Calori, E. Farella, and B. Riccò. Palmtop computers for managing interaction with immersive virtual heritage. In *Proceedings of EUROMEDIA2002*, pages 183–189, 2002.
- [BBKF97] R. Balakrishnan, T. Baudel, G. Kurtenbach, and G. W. Fitzmaurice. The rockin’mouse : Integral 3d manipulation on a plane. In *Proceedings of ACM CHI’97 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 311–318, 1997.
- [BBMP97] M. Billinghamurst, S. Baldis, L. Matheson, and M. Philips. 3d palette : a virtual reality content creation tool. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST’97)*, pages 155–156, 1997.
- [BFBK00] W. Buxton, G. Fitzmaurice, R. Balakrishnan, and G. Kurtenbach. Large displays in automotive design. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 20(4) :68–75, July-August 2000.
- [BFKB99] R. Balakrishnan, G. Fitzmaurice, G. Kurtenbach, and W. Buxton. Digital tape drawing. In *Proceedings of the 12th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 161–169. ACM Press, 1999.
- [BH95] D. A. Bowman and L. F. Hodges. User interface constraints for immersive virtual environment applications. Technical Report GIT-GVU-95-26, Graphics, Visualization and Usability Center, 1995.
- [BH97] D. A. Bowman and L. F. Hodges. An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments. In *Proceedings*

- of 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D 1997), pages 35–38, 182, 1997.
- [Bie86] E. A. Bier. Skitters and jacks : interactive 3d positioning tools. In *Proceedings of 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics*, pages 183–196, October 1986.
- [Bie90] E. A. Bier. Snap-dragging in three dimensions. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 90)*, 24(2) :193–204, 1990.
- [Bil98] M. Billinghurst. Put that where? voice and gesture at the graphic interface. *Computer Graphics*, 32(4) :60–63, 1998.
- [BIS00] L. Bouguila, M. Ishii, and M. Sato. A large workspace haptic device for human-scale virtual environments. In *Proceedings of Haptic Human-Computer Interaction*, 2000.
- [BIS02] L. Bouguila, M. Ishii, and M. Sato. Realizing a new step-in-place locomotion interface for virtual environment with large display system. In *Proceedings of the Workshop on Virtual Environments 2002*, pages 197–207. Eurographics Association, 2002.
- [BJH⁺01] A. Bierbaum, C. Just, P. Hartling, K. Meinert, A. Baker, and C. Cruz-Neira. VR Juggler : A virtual platform for virtual reality application development. In *Proceedings of IEEE VR 2001*, 2001.
- [BKH98] D. Bowman, D. Koller, and L. Hodges. A methodology for the evaluation of travel techniques for immersive virtual environments. *Virtual Reality : Research, Development, and Applications*, 3(2) :120–131, 1998.
- [BL01] M. Beaudouin-Lafon. Novel interaction techniques for overlapping windows. In *Proceedings of the 14th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST 2001)*, pages 153–154, 2001.
- [Bow99] D. Bowman. *Interaction Techniques for Common Tasks in Immersive Virtual Environments : Design, Evaluation, and Application*. PhD thesis, Virginia Polytechnic & State University, 1999.
- [BPBB96] M. Bouzit, G. V. Popescu, G. Burdea, and R. Boian. The rutgers master II-ND force feedback glove. In *Proceedings of Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 2002*, pages 145–152, 1996.
- [BSP⁺93] E. A. Bier, M. C. Stone, K. Pier, W. Buxton, and T. DeRose. Toolglass and magic lenses : The see-through interface. In *Proceedings of SIGGRAPH 93*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 73–80, 1993.
- [Bux83] W. Buxton. Lexical and pragmatic considerations of input structures. *Computer Graphics*, 17 :31–7, 1983.
- [BWH98] D. Bowman, J. Wineman, and L. Hodges. Exploratory design of animal habitats within an immersive virtual environment. Technical Report GIT-GVU-98-06, Georgia Institute of Technology GVU, 1998.
- [Car] Cartegie. <http://www.cartegie.com>.
- [Cat] Catia Delmia, Dassault systèmes. <http://www.dsddf.com/>.
- [CB] X. Cao and R. Balakrishnan. Visionwand : Interaction techniques for large displays using a passive wand tracked in 3d. To appear in ACM CHI Letters, ACM UIST 2003 Symposium on User Interface Software and Technology.

- [CEB78] S. K. Card, W. K. English, and B. J. Burr. Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys, and text keys for text selection on a crt. *Ergonomics*, 21 :601–613, 1978.
- [Chr] Chromium <http://sourceforge.net/projects/chromium/>.
- [CMN80] S. K. Card, T. P. Moran, and A. Newell. The keystroke-level model for user performance time with interactive systems. *Communication of the ACM*, 23(7) :396–410, 1980.
- [CMR90] S. K. Card, J. D. Mackinlay, and G. G. Robertson. The design space of input devices. In *Proceedings of ACM CHI'90 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 117–124, 1990.
- [CMS88] M. Chen, S. J. Mountford, and A. Sellen. A study in interactive 3-d rotation using 2-d control devices. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 88)*, 22(4) :121–129, August 1988.
- [CNSD93] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality : The design and implementation of the CAVE. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, volume 27, pages 135–142. ACM, 1993.
- [Cou00] Y. Couétard. *Caract  risaion et étalonnage des dynamom  tres    six composantes pour torseur associé à un système de forces*. PhD thesis, Université Bordeaux 1, 2000.
- [CPCS03] G. Casiez, P. Pl  nacoste, C. Chaillou, and B. Semail. The DigiHaptic, a new three degrees of freedom multi-finger haptic device. In *Proceedings of Virtual Reality International Conference (VRIC 2003)*, pages 35–39, 2003.
- [cvr] Centre de Réalité Virtuelle de Barcelone. <http://www.lsi.upc.es/dept/crv/>.
- [CW99] S. Coquillart and G. Wesche. The virtual palette and the virtual remote control panel : A device and an interaction paradigm for projection-based virtual environment. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality*, pages 213–216, 1999.
- [Dav98] J. Davis. Recognizing movements using motion histograms. Technical Report 487, MIT Media Lab, 1998.
- [DC02] J. Davis and X. Chen. Lumipoint : Multi-user laser-based interaction on large tiled displays. *Displays*, 23(5), 2002.
- [dlR01] J.-B. de la Riv  re. Interaction 3d : Utilisations conjointes d'un pointeur laser et d'un grand   cran. Master's thesis, Université Bordeaux 1, 2001.
- [dlRG03] J.-B. de la Riv  re and P. Guitton. Hand posture recognition in large displays VR environments. In *Gesture workshop*, 2003.
- [DM97] S. A. Douglas and A. K. Mithal. *The Ergonomics of Computer Input Devices*. New York : Springer, 1997.
- [DRC⁺00] T. Duval, J. Reginc  s, A. Chauffaut, D. Margery, and B. Arnaldi. Interactions collectives locales en immersion dans des univers virtuels 3d avec gasp. In *Actes de la conf  rence ERGO-IHM 2000*, pages 69–76, 2000.
- [DS93] R. P. Darken and J. L. Sibert. A toolset for navigation in virtual environments. In *Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '93)*, pages 157–165, 1993.

- [DS96] R. P. Darken and J. L. Sibert. Wayfinding strategies and behaviors in large virtual worlds. In *Proceedings of ACM SIGCHI'96*, 1996.
- [EBG⁺92] S. Elrod, R. Bruce, R. Gold, R. Goldberg, F. Halasz, W. Janssen, D. Lee, K. McCall, E. Pedersen, K. Pier, J. Tang, and B. Welch. Liveboard : a large interactive display supporting group meetings, presentations and remote collaboration. In *Proceedings of CHI 92*, pages 599–607, 1992.
- [EBSC99] L. M. Encarnação, G. Bimber, Dieter Schmalsteig, and S. D. Chandler. A translucent sketchpad for the virtual table exploring motion-based gesture recognition. *Computer Graphics Forum*, 18(3) :277–286, 1999.
- [EVR] Exploration of Virtual Realities : University Theatre and Department of Theatre and Film at the University of Kansas. <http://www.ku.edu/~mreaney/shows.html>.
- [FBK⁺00] W. T. Freeman, P. A. Beardsley, H. Kage, K.-I. Tanaka, K. Kyuma, and C. D. Weissman. Computer vision for computer interaction. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 33(4) :65–68, 2000.
- [FHZ96] A. Forsberg, K. Herndon, and R. Zeleznik. Aperture based selection for immersive virtual environments. In *Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '96)*, pages 95–96, 1996.
- [Fit54] P. M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47 :381–391, 1954.
- [Fit96] G. W. Fitzmaurice. *Graspable User Interfaces*. PhD thesis, University of Toronto, 1996. <http://www.dgp.toronto.edu/~gf/papers/PhDml>.
- [FLZ98] A. Forsberg, J. LaViola, and R. Zeleznik. Ergodesk : A framework for two and three dimensional interaction at the activedesk. In *Proceedings of the Second International Immersive Projection Technology Workshop (IPT'98)*, 1998.
- [FMHS93] S. Feiner, B. MacIntyre, M. Haupt, and E. Solomon. Windows on the world : 2d windows for 3d augmented reality. In *ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '93)*, pages 145–155, 1993.
- [FMP01] P. Fuchs, G. Moreau, and J-P Papin. *Le traité de la réalité virtuelle*. Les Presses de l'Ecole des Mines, 2001.
- [FWC84] J. D. Foley, V. L. Wallace, and P. Chan. The human factors of computer graphics interaction techniques. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 4(11) :13–48, November 1984.
- [GBK⁺01] T. Grossman, R. Balakrishnan, G. Kurtenbach, G. W. Fitzmaurice, A. Khan, and W. Buxton. Interaction techniques for 3d modeling on large displays. In *ACM Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D 2001)*, pages 17–23, 2001.
- [GC01] J. Grosjean and S. Coquillart. Command & control cube : a shortcut paradigm for virtual environments. In *Proceedings of IPT-EGVE'2001*, 2001.
- [Gib54] C. B. Gibbs. The continuous regulation of skilled response by kinaesthetic feedback. *British Journal of Psychology*, 45 :24–39, 1954.
- [Gra74] W. Graner. *Processing of Information and Structure*. New York : John Wiley & sons, 1974.

- [GSW01] F. Guimbretière, M. C. Stone, and T. Winograd. Fluid interaction with high-resolution wall-size displays. In *Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '01)*, pages 21–30, 2001.
- [Gyr] Gyromouse, Gyration. <http://www.gyration.com/gyromouse.htm>.
- [Han97] Chris Hand. A survey of 3d interaction techniques. *Computer Graphics Forum*, 16(5) :269–281, 1997.
- [HBCN02] P. Hartling, A. Bierbaum, and C. Cruz-Neira. Tweek : Merging 2d and 3d interaction in virtual environments. In *Proceedings of SCI 2002*, 2002.
- [HCN00] L. Hill and C. Cruz-Neira. Palmtop interaction methods for immersive projection technology systems. In *Proceedings of the International Projection Technologies Workshop (IPT 2000)*, 2000.
- [HdlRG03] M. Hachet, J.-B. de la Rivière, and P. Guitton. Interaction in large-display VR environments. In *Proceedings of Virtual Concept*, 2003.
- [HE98] C. G. Healey and J. T. Enns. Building perceptual textures to visualize multidimensional datasets. In *Proceedings of the conference on Visualization '98*, pages 111–118. IEEE Computer Society Press, 1998.
- [HG01] M. Hachet and P. Guitton. From cadastres to urban environments for 3d geo-marketing. In *Proceedings of IEEE/ISPRS joint workshop on remote sensing and data fusion over urban areas (URBAN 2001)*, pages 146–150, November 2001.
- [HG02] M. Hachet and P. Guitton. The Interaction Table - a new input device designed for interaction in immersive large display environments. In *Proceedings of the eighth Workshop on Virtual Environments (EGVE 2002)*, pages 189–196. Eurographics Association, 2002.
- [HG03] M. Hachet and P. Guitton. Using virtual reality for "new clowns". In *Proceedings of International Conference on Virtual Storytelling*, pages 211–219. Springer-Verlag, 2003.
- [HGRT03] M. Hachet, P. Guitton, P. Reuter, and F. Tyndiuk. The CAT for efficient 2D and 3D interaction as an alternative to mouse adaptations. In *Proceedings of ACM Virtual Reality Software and Technology (VRST'03)*, pages 205–212, 2003.
- [HH93] D. Hix and H. Hartson. *Developing User Interfaces : Ensuring Usability Through Product and Process*. New York : John Wiley & Sons, 1993.
- [Hof98] H.G Hoffman. Physically touching virtual objects using tactile augmentation enhances the realism of virtual environments. In *Proceedings of VRAIS'98*, pages 59–63, March 1998.
- [Hol] Holobench, Barco. <http://www.barco.com>.
- [HPGK94] K. Hinckley, R. Pausch, J. C. Goble, and N. F. Kassell. Passive real-world interface props for neurosurgical visualization. In *Proceedings of ACM CHI'94 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 452–458, 1994.
- [HPGK97] K. Hinckley, R. Pausch, J. C. Goble, and N. F. Kassell. A survey of design issues in spatial input. In *Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '94)*, pages 213–222, 1997.
- [HRG03] M. Hachet, P. Reuter, and P. Guitton. Camera viewpoint control with the Interaction Table. In *Proceedings of Virtual Reality International Conference (VRIC 2003)*, pages 41–47, 2003.

- [Imm] Immersion, *http://www.immerion.fr*.
- [IS94] M. Ishii and M. Sato. A 3d spatial interface device using tensed strings. *Presence*, 3(1) :81–86, 1994.
- [JJF01] J-P Jessel, C. Jaspard, and J-J Flores. Computer animation and virtual reality for live art performance. In *International Conference on Virtual Storytelling*, pages 205–207. Springer-Verlag, 2001.
- [JMF94] R. Jacoby and J. Humphries M. Ferneau. Gestural interaction in a virtual environment. In *Proceedings of Stereoscopic Display and Virtual Reality Systems (SPIE'94)*, pages 355–364, 1994.
- [JN01] D. R. Olsen Jr and T. Nielsen. Laser pointer interaction. In *Proceedings of CHI 2001*, pages 17–22, March-April 2001.
- [JOYBK90] F. P. Brooks Jr., M. Ouh-Young, J. J. Batter, and P. J. Kilpatrick. Project grope – haptic displays for scientific visualization. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 90)*, 24(4) :177–185, 1990.
- [JS92] R. Jacob and L. Sibert. The perceptual structure of multidimensional input device selection. In *Proceedings of ACM CHI'92 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 211–218, 1992.
- [KB94] G. Kurtenbach and W. Buxton. User learning and performance with marking menus. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 258–264. ACM Press, 1994.
- [KEPP01] R. Knudsen, T. Enig, D. A. Es Perge, and P. Mogensen. Interacting with laser pointers on large screens. In *Proceedings of the Human-Computer Interaction (Interact '01)*, pages 21–30, 2001.
- [KIMK00] Y. Kitamura, Y. Itoh, T. Masaki, and F. Kishino. Activecube : A bi-directional user interface using cubes. In *Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems & Allied Technologies*, 2000.
- [KYK96] Y. Kitamura, A. Yee, and F. Kishino. Virtual object manipulation using dynamically selected constraints with real-time collision detection. In *Proceedings of Virtual Reality Software and Technology (VRST'96)*, pages 173–181, 1996.
- [LaV99] J. J. LaViola. A survey of hand postures and gesture recognition. Technical Report CS-99-11, Brown University Providence, 1999.
- [LBCC01] A. Lécuyer, J.M. Burkhardt, S. Coquillart, and P. Coiffet. Boundary of illusion : an experiment of sensory integration with a pseudo-haptic system. In *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Virtual Reality (VR'01)*, pages 115–122, 2001.
- [LCK⁺00] A. Lécuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet. Pseudo-haptic feedback : Can isometric input devices simulate force feedback ? In *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Virtual Reality (VR'00)*, pages 83–90, 2000.
- [LGC] J. Legardeur, L. Garreau, and N. Couture. Des interacteurs pour l'assemblage mécanique en cao. To appear in 3rd International Conference on Integrated Design and Production, CPI'2003.
- [Lia94] J. Liang. JDCAD : A highly interactive 3d modeling system. *Computers and Graphics*, 18(4) :499–506, 1994.

- [LSH99] R. W. Lindeman, J. L. Sibert, and J. K. Hahn. Hand-held windows : Towards effective 2d interaction in immersive virtual environments. In *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Virtual Reality (VR'99)*, pages 205–212, 1999.
- [Lyn60] K. Lynch. *The Image of the City*. MIT Press, 1960.
- [Mac92] I. S. Mackenzie. Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7 :91–139, 1992.
- [MBN⁺02] B. Myers, R. Bhatnagar, J. Nichols, C. Peck, D. Kong, R. Miller, and C. Long. Interacting at a distance : Measuring the performance of laser pointers and others devices. In *CHI'2002 : Human Factors in Computing Systems*, pages 33–40, April 2002.
- [MCR90] Jock D. Mackinlay, Stuart K. Card, and George G. Robertson. Rapid controlled movement through a virtual 3d workspace. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 90)*, 24(4) :171–176, August 1990.
- [MHH01] W. E. Mackay, E. Holm, and S.B. Horn. Who's in control? exploring human-agent interaction in the McPie Interactive Theater project. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2001.
- [Mim] Mimio. <http://www.mimio.com>.
- [Min95] M. R. Mine. Virtual environment interaction techniques. Technical Report TR95-018, UNC Chapel Hill Computer Science, 1995.
- [MJS97] M. R. Mine, F. P. Brooks Jr., and C. H. Séquin. Moving objects in space : Exploiting proprioception in virtual-environment interaction. In *Proceedings of SIGGRAPH 97*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 19–26, August 1997.
- [MR97] N. Matsushita and J. Rekimoto. Holowall : designing a finger, hand, body, and object sensitive wall. In *Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User Interface Software and Technology*, pages 209–210. ACM Press, 1997.
- [MS94] T. H. Massie and J. K. Salisbury. The phantom haptic interface : A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the 1994 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, pages 295–302, 1994.
- [MSG98] B. A. Myers, H. Stiel, and R. Gargiulo. Collaboration using multiple PDAs connected to a pc. In *Proceedings of the 1998 ACM conference on Computer Supported Cooperative Work*, pages 285–294, 1998.
- [MSR89] M. J. Massimino, T. B. Sheridan, and J. B. Roseborough. One hand tracking in six degree of freedom. In *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pages 498–503, 1989.
- [MW93] I.S. MacKenzie and C. Ware. Lag as a determinant of human performance in interactive systems. In *proceedings on Human factors in computing systems*, pages 488–493, April 1993.
- [NBB⁺99] V. Normand, C. Babski, S. Benford, A. Bullock, S. Carion, N. Farcet, E. Frécon, N. Kuijpers, N. Magnenat-Thalmann, S. Raupp-Musse, T. Rodden, M. Slater, G. Smith, A. Steed, D. Thalmann, J. Tromp, M. Usuh, G. Van Liempd, and N. Kladias. The coven project - exploring applicative, technical, and usage dimensions of collaborative virtual environments. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2) :218–236, 1999.

- [Nie93] J. Nielsen. Non-command user interfaces. *Communication of the ACM*, 36(4) :83–99, 1993.
- [Nor90] D. Norman. *The Design of Everyday things*. New York : Doubleday, 1990.
- [NSM00] Noma, Sugihara, and Miyasayo. Development of ground surface simulator for tel-e-merge system. In *Proceedings of IEEE-Virtual Reality 2000 Conference*, pages 217–224, 2000.
- [OIV] OpenInventor. <http://oss.sgi.com/projects/inventor/>.
- [osg] OpenSG, <http://www.opensg.org>.
- [PBWI96] I. Poupyrev, M. Billinghamurst, S. Weghorst, and T. Ichikawa. Go-go interaction technique : Non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '96)*, pages 79–80, 1996.
- [PCS+00] E. Patrick, D. Cosgrove, A. Slavkovic, J. Rode, T. Verratti, and G. Chiselko. Using a large projection screen as an alternative to head-mounted displays for virtual environments. *CHI Letters*, 2 :478–485, April 2000.
- [Pec01] C. Peck. Useful parameters for the design of laser pointer interaction techniques. In *ACM CHI'2001 Student Posters*, April 2001.
- [Pia79] *Théorie du langage et théories de l'apprentissage*. 1979.
- [Plo74] E. C. Plouton. *Tracking skill and manual control*. New York : Academic Press, 1974.
- [PMMH93] E. R. Pedersen, K. McCall, T. P. Moran, and F. G. Halasz. Tivoli : an electronic whiteboard for informal workgroup meetings. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 391–398, 1993.
- [PNW98] I. Poupyrev, T. Numada, and S. Weghorst. Virtual notepad : Handwriting in immersive vr. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual Symposium (VRAIS '98)*, pages 126–132, 1998.
- [PWBI97] I. Poupyrev, S. Weghorst, M. Billinghamurst, and T. Ichikawa. A framework and testbed for studying manipulation techniques fo immersive vr. In *Proceedings of Virtual Reality Software and Technology (VRST'97)*, pages 21–28, 1997.
- [Rem] RemotePoint, Interlink Electronics. <http://www.rpnav.com/>.
- [RH92] W. Robinett and R. Holloway. Implementation of flying, scaling, and grabbing in virtual worlds. *Computer Graphics (Proceedings of 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics)*, 25(2) :189–192, 1992.
- [SCP95] R. Stoakley, M.J. Conway, and R. Pausch. Virtual reality on a wim : Interactive worlds in miniature. In *Conference proceedings on Human factors in computing systems*, pages 265–272, May 1995.
- [SES99] D. Schmalstieg, L. M. Encarnação, and Z. Szalavári. Using transparent props for interaction with the virtual table. In *Proceedings of 1999 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 147–154, 1999.
- [SG97] Z. Szalavári and M. Gervautz. Using the personal interaction panel for 3d interaction. In *Proceedings of the Conference on Latest Results in Information Technology*, pages 3–6, 1997.

- [SHGG⁺99] L. Serra, N. Hern, C. Gim-Guan, E. Lee, Y. H. Lee, Y. T. Tsai, C. Chan, and R. A. Kockro. An interface for precise and comfortable 3d work with volumetric medical datasets. In *Proceedings of Medicine Meets Virtual Reality*, 1999.
- [Sma] Smarttech. Smart Technologies. <http://www.smarttech.com>.
- [SN97] L. Serra and H. Ng. Krdl internal technical report, 1997.
- [Spa] Spacemouse, 3D Connexion. <http://www.3dconnexion.com>.
- [SSK01] Y. Sato, M. Saito, and H. Koike. Real-time input of 3d hand pose and gestures of a user's hand and its applications for hci. In *Virtual Reality 2001 Conference*, 2001.
- [SSS01] S. L. Stoev, D. Schmalstieg, and W. Straßer. Two-handed through-the-lens-techniques for navigation in virtual environments. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Virtual Environments (EGVE 2001)*, 2001.
- [Tar03] N. Tarrin. Interaction haptique sur plan de travail virtuel, 2003.
- [tdc] tdc. Le théâtre du chapeau. <http://www.theatre-du-chapeau.com/>.
- [TTSC03] F. Tyndiuk, G. Thomas, C. Schlick, and B. Claverie. Modèles et facteurs humains en IHM. application a la réalité virtuelle. In *MFI'03 - Modèles Formels de l'Interaction*, 2003.
- [VCWP96] J. Viega, M. J. Conway, G. Williams, and R. Pausch. 3d magic lenses. In *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 51–58. ACM Press, 1996.
- [vdPHP99] R. van de Pol, L. Hodges, and F. Post. Interaction in semi-immersive large display environments. In *Proceedings of Virtual Environments 99*, pages 157–168, 1999.
- [Ven93] D. Venolia. Facile 3d direct manipulation. In *Proceedings of interCHI'93*, pages 31–36, 1993.
- [VW] Fakespace V-Wand. <http://www.fakespacesystems.com/worktools.shtml>.
- [War00] C. Ware. *Information visualization : perception for design*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2000.
- [WDC99] K. Watsen, R. Darken, and M. Capps. A handheld computer as an interaction device to a virtual environment. In *Proceedings of the International Projection Technologies Workshop (IPT'99)*, 1999.
- [WF02] G. Welch and E. Foxlin. Motion tracking : No silver bullet, but a respectable arsenal. *IEEE Computer Graphics and Applications, special issue on Tracking*, 22(6) :24–38, 2002.
- [WG95] Matthias M. Wloka and Eliot Greenfield. The virtual tricorder : A uniform interface for virtual reality. In *ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '95)*, pages 39–40, 1995.
- [Wis01] M. Wissen. Implementation of a laser-based interaction technique for projection screens. *ERCIM news*, 46, July 2001.
- [WJ88] Colin Ware and Danny R. Jessome. Using the bat : A six-dimensional mouse for object placement. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 8(6) :65–70, November 1988.

- [WKS99] S. Walairacht, Y. Koike, and M. Sato. A new haptic display for both-hands-operation : SPIDAR-8. In *Proceedings of ISPACS'99*, pages 569–572, 1999.
- [WO90] C. Ware and S. Osborne. Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments. *Computer Graphics (Proceedings of 1990 Symposium on Interactive 3D Graphics)*, 24(2) :175–183, March 1990.
- [WR99] C. Ware and J. Rose. Rotating virtual objects with real handles. *ACM transactions on Computer–Human Interaction*, 6(2) :162–180, 1999.
- [ZBM96] S. Zhai, W. Buxton, and P. Milgram. The partial occlusion effect : Utilizing semi-transparency in 3d human computer interaction. *ACM Transactions on Computer–Human Interaction*, 3(3) :254–284, 1996.
- [Zha95] S. Zhai. *Human Performance in Six Degree of freedom Input Control*. PhD thesis, University of Toronto, 1995. http://vered.rose.utoronto.ca/people/shumin_dir/papers/PhD-Thesis/top_page.html.
- [Zha98] S. Zhai. User performance in relation to 3d input device design. *Computer Graphics*, 32(4) :50–54, 1998.
- [ZHH96] R. C. Zeleznik, K. P. Herndon, and J. F. Hughes. Sketch : An interface for sketching 3d scenes. In *Proceedings of SIGGRAPH 96*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 163–170, 1996.
- [ZM93] S. Zhai and P. Milgram. Human performance evaluation of manipulation schemes in virtual environments. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual Symposium (VRAIS '93)*, pages 155–161, 1993.
- [ZM94] S. Zhai and P. Milgram. Input techniques for HCI in 3D environments. In *Conference companion on Human factors in computing systems*, pages 85–86, 1994.
- [ZM98] S. Zhai and P. Milgram. Quantifying coordination in multiple DOF movement and its application to evaluating 6 DOF input devices. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 320–327, 1998.

Résumé

Les interfaces de visualisation collective à base de grands écrans permettent à plusieurs participants, localisés en un lieu unique, d'être immergés dans un même environnement virtuel (EV). Malgré leur potentiel pour le travail de groupe, ces interfaces restent souvent sous-utilisées, car les utilisateurs n'ont pas la possibilité d'interagir facilement et efficacement avec les EV qu'ils sont en train de visualiser.

Nous nous proposons d'étudier les caractéristiques des interfaces de visualisation collective afin de définir un ensemble de recommandations pour l'interaction avec des EV. A partir de ces recommandations, nous critiquons les interfaces d'action existantes et proposons une nouvelle interface appelée le CAT.

Le CAT est une interface d'action à six degrés de liberté fonctionnant à partir de modes de résistances isotoniques et isométriques. Un plateau mobile articulé autour d'un pied fixe permet la réalisation de tâches d'interaction 3D (navigation, manipulation). Une tablette graphique, fixée sur le plateau permet la réalisation de tâches d'interaction 2D (sélection, contrôle du système). La structure du CAT favorise une interaction non contraignante, rapide et efficace pour des utilisateurs novices.

Une évaluation formelle a permis de montrer que le CAT était plus performant qu'une spacemouse pour des tâches de manipulation d'objets 3D, et que les préférences des utilisateurs étaient en sa faveur. Le CAT a été utilisé pour des applications de revue de projet et de théâtre interactif. Cette nouvelle interface d'action favorise le développement d'applications concrètes utilisant des EV affichés au moyen d'interfaces de visualisation collective.

Mots clés : Environnements virtuels, grands écrans, périphériques 3D, interaction 3D, interaction 2D, techniques d'interaction, Interaction Homme-Machine, evaluation.

Discipline : Informatique

Abstract

Large-displays used as collective visualization interfaces allow several co-located participants to be immersed in virtual environments (VE). In spite of their potential for group works, large-displays are often under-used because the users cannot interact easily and efficiently with the visualized VE.

The study of the characteristics of the large-displays allows us to propose a set of recommendations for interaction with the VE. From these recommendations, we criticize the existing input devices, and propose a new input device : the CAT (Control Action Table).

The CAT is a 6 degrees of freedom device mixing isotonic and isometric resistance modes. It consists of a freestanding sensitive top, which can be orientated in space. The manipulation of this top allows to perform 3D tasks (manipulation, navigation). A tablet, fixed on the top, allows to perform 2D tasks (selection, system control). The CAT design favours a non-constraining, quick and efficient interaction for novice users.

A user study has shown that the CAT is more efficient than a standard 6 DOF rate controller for 3D manipulation tasks, and that the user preferences are in its favour. The

CAT has been used for applications of project review and interactive theatre. This new input device favours the development of real applications using VE visualized on large-displays.

Keywords : Virtual environments, large displays, input devices, 3D interaction, 2D interaction, interaction techniques, Human-Computer Interaction, evaluation.

Discipline : Computer Science

LaBRI,
Université Bordeaux 1,
351, cours de la libération
33405 Talence Cedex (FRANCE)