

Interaction 3D en Réalité Virtuelle : Etat de l'art

Nassima Ouramdane*

Samir Otmane†

Malik Mallem‡

Laboratoire IBISC CNRS FRE 3190
Université d'Evry Val d'Essonne

RÉSUMÉ

Depuis l'apparition de la technologie de la réalité virtuelle, les chercheurs se sont intéressés particulièrement à l'interaction 3D qui peut être considérée comme la composante motrice de tout système interactif. En effet, l'interaction donne une meilleure sensation d'immersion et un sentiment d'être réellement dans l'univers virtuel. Dans cet article, nous proposons une revue des techniques d'interaction 3D utilisées par les communautés des réalités virtuelle et augmentée. Nous présentons par la suite une analyse et un bilan sur l'état actuel de la recherche dans le domaine de l'interaction 3D ainsi qu'une nouvelle voie à explorer pour interagir facilement et efficacement avec des environnements complexes.

Keywords: Interaction 3D, Réalité Virtuelle, Réalité Augmentée, Technique d'Interaction.

1 INTRODUCTION

A l'aube du vingt-et-unième siècle, la Réalité Virtuelle (RV) révolutionne déjà la façon dont nous voyons, percevons et analysons le monde qui nous entoure. Imaginez que vous puissiez voyager dans le corps humain et ses organes ou bien encore interagir avec des entités qui n'existent pas, les toucher, les prendre, les déplacer et/ou les déformer. La technologie de la RV nous permet de réaliser tout cela et même encore plus. Que représente alors cette nouvelle technologie qui nous permet d'effectuer des tâches que nous ne pouvons pas accomplir habituellement dans le monde réel ?

Malgré son apparition au milieu du 19ème siècle avec l'invention d'un appareil capable de reproduire une image en trois dimensions, le terme RV a été introduit pour la première fois en 1986 par Jaron Lanier. Celui-ci décrit la RV comme étant une technologie qui utilise les ordinateurs pour créer des réalités synthétisées, partageables par plusieurs personnes, que nous pourrions appréhender par les cinq sens et avec lesquelles nous pouvons interagir, le tout par l'intermédiaire d'artefacts informatisés [46].

Depuis son introduction, la RV a été définie de plusieurs manières. Elle peut être définie par sa finalité, ses applications, ses fonctions ou encore les techniques sur lesquelles elle repose [30]. Ces différentes définitions divisent les chercheurs en plusieurs camps, selon leur communauté scientifique et leur propre définition du « virtuel ». Paul Milgram [51] a proposé une unification des concepts en considérant un continuum linéaire qui va du réel au virtuel. Il définit le terme Réalité Mixte (RM) comme l'intervalle entre le réel et le virtuel. La Réalité Mixte est composée de la Réalité Augmentée (RA) et la Virtualité Augmentée (VA).

Dans ce qui suit, nous présentons brièvement quelques définitions nécessaires pour la compréhension de la suite de cet article.

2 QUELQUES DÉFINITIONS

2.1 La réalité virtuelle

La RV est une nouvelle technologie qui se situe à la croisée de plusieurs disciplines telles que l'informatique graphique, la conception assistée par ordinateur, la simulation, la téléopération, l'audiovisuel ou le travail collaboratif. Elle utilise de nombreux périphériques matériels et des techniques logicielles pour chaque domaine applicatif.

Aujourd'hui, la RV peut être désignée par plusieurs termes que nous trouvons dans la littérature scientifique (et populaire) tels que « Environnement Virtuel », « Espace Virtuel », « Monde Artificiel », « Réalité Synthétique » et bien d'autres encore. Les définitions de chacun de ces termes comportent, d'un domaine à l'autre, des nuances, parfois importantes. Les chercheurs d'un domaine ne donnent pas forcément la même définition que ceux d'un autre domaine pour le même terme.

Parmi les premières définitions de la communauté française de la RV, nous citons celle de Burdea et Coiffet [14] qui ont introduit trois composantes de base pour la RV : l'immersion, l'interaction et l'imagination. En effet, un utilisateur interagit avec un environnement virtuel qui doit être représenté de manière réaliste pour donner une meilleure sensation d'immersion. Les entités composant cet environnement doivent être autonomes afin qu'elles puissent réagir en temps réel aux actions de l'utilisateur.

Certains auteurs considèrent cette nouvelle technologie comme une extension des Interfaces Homme-Machine classiques. Les interfaces résultantes dites « avancées » simulent des environnements réalistes et permettent à des participants d'interagir avec ceux-ci : *"VR is an advanced human-computer interface that simulates a realistic environment and allows participants to interact with it [24]."*

D'autres encore la définissent comme des mondes simulés par des ordinateurs au sein desquels l'homme est l'acteur principal et peut appréhender le réel à travers ses sens, ses actions et son esprit. Ainsi Jacques Tisseau [76] définit la RV comme : « *une réalité virtuelle est un univers de modèles au sein duquel tout se passe comme si les modèles étaient réels parce qu'ils proposent simultanément la triple médiation des sens, de l'action et de l'esprit.* »

D'autres définitions de la RV d'un point de vue fonctionnel, technique et philosophique sont détaillées dans [31] et [32].

Quelle que soit la définition de cette réalité dite virtuelle, sa finalité reste la même. C'est pour cette raison que Fuchs et associés la définissent à travers sa finalité : « *La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel.* » [31]

En ce qui nous concerne, nous considérons la RV comme une technologie qui immerge un ou plusieurs utilisateur(s) dans un monde synthétique représentant un environnement réel ou imaginaire et qui permet à ces utilisateurs d'être des acteurs capables de changer les propriétés de l'environnement et d'interagir avec les différentes entités composant l'univers simulé.

*e-mail: nassima.ouramdane@ibisc.univ-evry.fr

†e-mail: samir.otmane@ibisc.univ-evry.fr

‡e-mail: malik.mallem@ibisc.univ-evry.fr

2.2 Environnement virtuel

Le terme « environnement virtuel » (en anglais « virtual environment ») a été introduit par les chercheurs du MIT (Massachusetts Institute of Technology) au début des années 90 comme synonyme de RV [38]. Il est considéré comme le lieu suggéré par la RV pour accueillir un ou plusieurs utilisateurs et leur permettre d'accomplir certaines tâches avec l'impression d'être dans un cadre spécifique. L'environnement virtuel est représenté par un modèle 3D de données réelles ou imaginaires qu'on peut visualiser et avec lesquelles on peut interagir en temps réel [36].

Il existe différents types d'environnements virtuels selon le degré d'immersion qu'ils procurent à l'utilisateur : environnement virtuel non-immersif (Non-Immersive Virtual Environment " NIVE "), environnement virtuel semi-immersif (Semi-Immersive Virtual Environment " SIVE "), environnement virtuel totalement immersif (Fully-Immersive Virtual Environment " FIVE ") [43].

2.3 Technique, paradigme et métaphore d'interaction

En RV, les utilisateurs ont besoin d'interagir avec les objets qui composent le monde virtuel. Une technique d'interaction désigne la méthode qui permet d'effectuer une tâche d'interaction dans un environnement virtuel [36]. Foley et associés [26] considèrent celle-ci comme la manière d'utiliser un périphérique pour accomplir une tâche sur un ordinateur. Elle peut être définie aussi comme le scénario qui utilise l'interface motrice d'une application donnée pour traduire les mouvements de l'utilisateur en des actions dans le monde virtuel.

En RV, la notion de paradigme d'interaction est utilisée par certains auteurs pour désigner un ensemble de règles et de techniques permettant à l'utilisateur d'accomplir des tâches d'interaction au sein d'un environnement virtuel. En ce qui nous concerne, nous définissons un paradigme d'interaction comme l'ensemble de règles qui constituent la méthode qui permet à un utilisateur d'interagir avec son environnement virtuel.

La métaphore d'interaction signifie qu'un outil virtuel est la métaphore, la transposition, d'un objet ou d'un concept réel [70]. Une métaphore d'interaction regroupe un ensemble de techniques d'interaction qui utilisent le même outil virtuel ou le même concept pour interagir avec les objets de l'espace virtuel.

3 LES COMPOSANTES DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE

Les premiers travaux dans le domaine de la RV se sont focalisés sur la conception et la réalisation d'interfaces comportementales favorisant l'immersion de l'utilisateur et ses capacités d'interaction dans l'univers virtuel [31]. Ces interfaces permettent de caractériser la présence de l'utilisateur et de lui procurer une certaine autonomie au sein des mondes virtuels. Zeltzer [83] a défini trois composantes de base pour la RV qui sont en parfaite correspondance avec les objectifs de la plupart des travaux dans ce domaine. Ces composantes sont l'autonomie, la présence et l'interaction.

Jacques Tisseau quant à lui s'est basé sur les notions de présence et d'autonomie pour définir toute application de RV. En effet, une application de RV est caractérisée par deux critères de base : la présence et l'autonomie [76]. La présence elle-même est caractérisée par les critères d'immersion et d'interaction. Ainsi, une application en RV sera définie par ses trois composantes principales : immersion, interaction et autonomie.

3.1 Immersion

Dans la communauté scientifique de RV, le terme immersion est couramment utilisé dans des formules telles que : système immersif, utilisateur immergé, immersion dans un environnement

virtuel. Que représente alors l'immersion en RV ?

Burkhardt et associés [15] définissent le terme immersion comme l'exposition d'un utilisateur à un environnement virtuel au moyen de dispositifs occultant tout ou partie du monde réel, pour afficher en lieu et place un monde simulé numériquement.

L'immersion est liée directement à la perception de l'utilisateur de son monde virtuel. Elle est obtenue en remplaçant le plus grand nombre de sensations naturelles par leurs correspondances dans l'univers virtuel [50]. Bowman [8] définit l'immersion comme la sensation d'être présent, qui est assurée par certains environnements virtuels. Selon cet auteur, un utilisateur est dit " immergé " lorsqu'il sent que le monde virtuel qui l'entoure a remplacé le monde physique avec un certain degré.

La présence d'un utilisateur dans un monde virtuel est un autre facteur qui joue un rôle important pour une meilleure sensation d'immersion. En effet, la présence procure à l'utilisateur un sentiment d'être " à l'intérieur " de l'environnement virtuel. Lorsqu'on parle de présence, il est essentiel de faire la différence entre la présence virtuelle et la présence sociale (*co-présence*) [68][67][17]. Le premier type de présence correspond à la sensation que l'on cherche à donner à l'utilisateur de faire partie du monde virtuel et que les objets qui l'entourent sont réellement présents [15][50][73]. La présence sociale, quant à elle, caractérise les environnements virtuels collaboratifs. Elle se réfère à la conscience que l'utilisateur a des autres participants et de leurs activités au sein de l'univers partagé.

Pour donner le sentiment de présence aux utilisateurs dans un environnement virtuel, les participants sont fréquemment représentés par des objets virtuels appelés *avatars*. Kadri et associés [41][42] évoquent l'importance de la représentation des utilisateurs par des avatars dans les environnements virtuels. En effet, l'apparence des avatars des utilisateurs influence sur la manipulation d'objets dans les environnements virtuels.

3.2 Autonomie

En RV, la notion d'autonomie est liée aux différentes composantes de l'environnement virtuel. L'utilisateur fait partie de ces composantes et il est considéré comme l'entité la plus active de cet espace. La place de l'utilisateur en RV n'est pas la même qu'en simulation scientifique ou interactive [76]. Dans le cas d'une simulation scientifique, l'utilisateur fixe les paramètres avant la simulation et analyse les résultats après. En simulation interactive, l'utilisateur interagit en cours de la simulation mais il ne fait rien d'autre que de modifier les différents paramètres de la simulation. Par contre, dans le cas d'une application en RV, l'utilisateur est exposé à un environnement numérique autonome qui procure à l'utilisateur une certaine liberté pour évoluer, changer les propriétés de l'environnement virtuel et interagir avec ses entités sans fixer des paramètres avant ou pendant l'expérience. L'utilisateur est souvent représenté par un avatar qui peut être à la fois spectateur, acteur et créateur de l'univers numérique. L'autonomie de l'utilisateur réside dans sa capacité à coordonner ses perceptions et ses actions au cours du processus de l'interaction avec les autres entités.

3.3 Interaction

Depuis l'apparition de la RV, les chercheurs se sont particulièrement intéressés à l'interaction 3D qui peut être considérée comme la composante motrice de tout système interactif. L'interaction peut être définie comme étant un langage de communication entre l'homme et la machine. Ce langage correspond à l'ensemble des actions/réactions réciproques entre l'homme et l'ordinateur par l'intermédiaire d'interfaces sensorielles, d'interfaces motrices et de techniques d'interactions [70].

Nous définissons l'interaction 3D comme un système qui utilise

des logiciels en entrée pour mettre en relation les différents périphériques matériels et les techniques logicielles afin de faire fonctionner une application donnée en sortie. Ces différents logiciels permettent d'utiliser le matériel mis à la disposition de l'utilisateur, via les pilotes en offrant un accès aux périphériques de bas niveau, et les logiciels applicatifs de haut niveau. Les différentes techniques d'interaction se situent entre la couche « matériels » (bas niveau) et la couche « applications » (haut niveau).

4 CLASSIFICATION DES TECHNIQUES D'INTERACTION 3D

L'interaction 3D donne aux utilisateurs le pouvoir de réaliser différentes tâches au sein d'un monde virtuel. Une tâche peut être définie comme la fonction que l'utilisateur exécute à un moment donné. Le résultat de l'exécution de cette fonction se traduira par les changements de l'état du système dans lequel l'utilisateur évolue.

Nous pouvons définir l'interaction en RV comme la traduction des actions des utilisateurs dans le monde réel en des tâches spécifiques dans l'espace virtuel. En effet, les chercheurs tentent de plus en plus de reproduire dans un environnement virtuel des gestes identiques à ceux de la vie quotidienne. Par exemple : se déplacer pour découvrir un lieu inconnu ou pour aller dans un endroit bien précis, toucher, prendre et/ou manipuler des objets. Pour chacun de ces gestes, plusieurs techniques spécifiques ont été développées ces dernières années.

Aujourd'hui, le nombre de ces techniques d'interaction est suffisamment important pour les classer selon certains critères. Il existe plusieurs classifications des techniques d'interaction 3D. En 1995, Mine [52] propose la première classification basée sur quatre tâches fondamentales : la navigation, la sélection, la manipulation et la mise à l'échelle. Il a également défini une cinquième tâche qui dérive des quatre précédentes : menus virtuels et l'interaction par widgets. Hand [37] introduit les bases de la classification moderne qui sera reprise par Bowman en 1999 dans son mémoire de thèse [8]. Cette dernière classe les différentes techniques d'interaction selon quatre tâches principales d'interaction 3D : la navigation, la sélection, la manipulation et le contrôle d'application. Sternberger et associés [70] rajoutent à ces quatre tâches une cinquième tâche qui est l'entrée de symboles. Cette tâche regroupe toutes les techniques qui permettent d'entrer des symboles comme des chiffres et des lettres. Coquillar et associés [18] proposent une autre classification des techniques d'interaction. Ces derniers décomposent chaque application en des tâches élémentaires, appelées primitives comportementales virtuelles (PCV). Ces PCV sont les objectifs du niveau d'immersion et d'interaction (I^2) fonctionnelles. Les tâches élémentaires vont être réalisées par l'utilisateur grâce aux techniques d'interaction. Quelle que soit l'application, les PCV peuvent être regroupées en quatre catégories : observer le monde virtuel, se déplacer dans le monde virtuel, agir sur le monde virtuel et communiquer avec autrui ou avec l'application pour son contrôle [18].

Dans ce qui suit, nous présentons les quatre tâches d'interaction 3D suivantes : la navigation, la sélection, la manipulation et le contrôle d'application.

4.1 La navigation

Comme dans le monde réel, l'utilisateur a besoin de se déplacer dans la scène virtuelle pour réaliser certaines tâches. L'action « se déplacer » va de bouger sa tête pour observer un objet de plus près ou d'un autre angle, à se promener dans un parc ou visiter un musée, voire se déplacer d'une planète à une autre. La navigation désigne l'ensemble des méthodes qui permettent de connaître la position d'un objet par rapport à un système de référence, ou par rapport à un point fixe déterminé.

Certains auteurs considèrent la navigation comme la capacité de bouger à l'intérieur d'une scène générée par l'ordinateur [64]. D'autres encore la définissent comme l'ensemble des déplacements de l'utilisateur à l'intérieur de l'espace virtuel [23]. Bowman et associés [5] considèrent cette tâche comme la plus commune à tous les environnements virtuels. Elle permet aux utilisateurs d'explorer, de rechercher et/ou de manoeuvrer dans l'espace virtuel. Bowman et associés définissent deux composantes principales pour la navigation : le déplacement et la recherche d'itinéraire [9].

Le déplacement représente la composante motrice de la navigation. Il se rapporte aux déplacements physiques de l'utilisateur d'un endroit à un autre.

La recherche d'itinéraire correspond à la composante cognitive de la navigation. Elle permet aux utilisateurs de se repérer dans l'environnement et de choisir une trajectoire pour se déplacer [31]. Dans ce cas, l'utilisateur se pose des questions telles que : "où suis-je ?", "où doit-je aller ?", "comment arriver à cet endroit ?".

Plusieurs facteurs influencent la qualité d'une technique de navigation. Ainsi Bowman et associés [9] définissent les facteurs à prendre en considération dans la conception de toute technique de navigation :

- La vitesse de déplacement (le temps d'achèvement d'une tâche de navigation) ;
- La précision d'exécution ;
- La conscience spatiale (connaissance de l'utilisateur de sa position et de son orientation dans l'environnement virtuel pendant et après la navigation) ;
- La facilité d'apprentissage (la capacité d'un utilisateur débutant à s'approprier la technique de navigation) ;
- La facilité d'utilisation ;
- La capacité de l'utilisateur à collecter des informations sur l'environnement pendant le voyage ;
- La présence virtuelle (le sentiment de l'utilisateur d'être immergé dans l'environnement virtuel) ;
- Le confort de l'utilisateur.

Selon que l'on connaît ou non sa destination, la navigation peut être libre ou assistée. Dans le cas d'une navigation libre, l'utilisateur ne connaît pas précisément sa destination. Il se déplace dans l'espace dans le but de découvrir et d'explorer l'univers virtuel. Dans le cas d'une navigation assistée, l'utilisateur avance dans l'espace virtuel pour aller à un endroit bien précis qui représente la cible du déplacement. Pour cela, l'utilisateur est aidé pendant le processus de navigation afin de se repérer et trouver la bonne trajectoire.

Dans ce qui suit, nous allons voir un ensemble de métaphores de navigation. Nous classons les différentes techniques de navigation en deux grandes familles : les techniques de navigation libre et les techniques de navigation assistée.

4.1.1 La navigation libre

Dans la plupart des cas d'étude sur l'interaction 3D, le concept utilisé pour le développement de nouvelles techniques est inspiré de l'interaction de l'être humain avec son environnement réel. Par exemple, marcher est le moyen le plus naturel et le plus utilisé pour se déplacer d'un endroit à un autre dans la vie quotidienne. Cette manière de se mouvoir est largement utilisée en RV. En effet, plusieurs métaphores de navigation sont inspirées de ce geste habituel. Ware et associés [78] ont défini une des premières métaphores de navigation basée sur la marche réelle, cette dernière a la particularité d'être simple et naturelle. L'utilisateur se déplace librement à l'intérieur d'un cyberspace en marchant physiquement selon les contraintes de place et en tournant sa tête pour changer sa direction. Plusieurs techniques d'interaction basées sur la métaphore de la marche réelle existent aujourd'hui et chacune

d'elles utilise un périphérique matériel spécifique pour permettre à l'utilisateur de marcher physiquement sur place. La figure 1 montre quelques exemples de ces périphériques tels que la cyberSphere, le tapis roulant et la bicyclette.

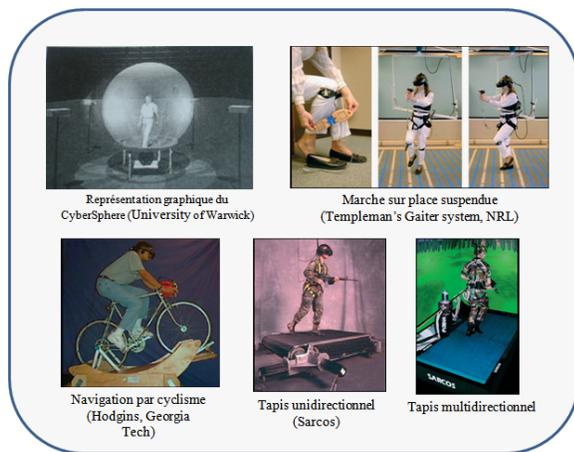


FIG. 1: Périphériques de marche.

Lorsque l'utilisateur navigue dans le but d'explorer et de découvrir l'espace virtuel, son trajet se dessine au fur et à mesure de son avancée dans l'environnement. Pour cela, l'utilisateur doit disposer des moyens qui lui permettent de démarrer et d'arrêter le processus de navigation, de modifier la vitesse et la direction du déplacement. Bowman et associés [5] classent les différentes techniques de navigation selon les trois tâches de base du déplacement : le choix de la direction ou la cible, le choix de la vitesse/accélération du mouvement et le choix des conditions d'entrée.

La direction du mouvement : La direction du mouvement peut être indiquée de plusieurs manières, parmi elles, l'utilisation d'un joystick pour avancer et reculer dans l'environnement virtuel. Le début et la fin du mouvement sont indiqués en appuyant sur un bouton du périphérique. Il existe des périphériques à 6 degrés de liberté (DDL) qui disposent de trois degrés de déplacement et trois degrés de rotation. Nous parlons ici de la métaphore de la soucoupe volante introduite par Butterworth et associés [16].

Avancer dans un monde virtuel à l'aide d'un dispositif tenu à la main n'est pas la seule manière de naviguer. En effet, Mine [53] introduit une autre technique de déplacement pour laquelle la direction est donnée par l'orientation de la tête. Il s'agit de déplacer le point de vue de l'environnement virtuel dans la direction du regard de l'utilisateur qui est déterminée par les mouvements de la tête. C'est une technique cognitivement simple et très utilisée mais elle présente un inconvénient majeur puisqu'elle ne permet pas à l'utilisateur de voir sur les côtés en se déplaçant.

Pour pallier ce problème, la technique dite de « direction de la main » a été inventée [65] [8]. Cette dernière permet à l'utilisateur de se déplacer et regarder dans différentes directions. La direction du mouvement est déterminée constamment par l'orientation de la main de l'utilisateur. Cette technique est un peu plus difficile à apprendre pour certains utilisateurs, mais elle est plus flexible que la technique de direction du regard. La technique « Grabbing the air » [49] est un autre exemple de technique qui utilise la main pour déterminer la direction du mouvement. Cependant, à la différence de la technique précédente, celle-ci utilise les gestes de la main pour indiquer la direction du déplacement. Cette technique est basée sur la métaphore du « tiré sur une corde ». Elle est souvent réalisée en utilisant des gants de pincement (*Pinch Gloves*) et peut être utilisée avec une ou deux mains (voir la figure 2.a).

En général, lorsqu'une personne discute avec d'autres, elle tourne naturellement son corps vers ses interlocuteurs. Bowman et associés [8] se sont inspirés de cet exemple réel pour mettre en place la technique qui détermine la direction du déplacement à l'aide de la direction du torse de l'utilisateur.

L'utilisation d'une carte est une autre manière de caractériser un déplacement dans un monde virtuel [20]. L'utilisateur est représenté par une icône dans une carte 2D. Le déplacement de l'icône par un stylet jusqu'au nouvel endroit de la carte implique le déplacement de l'utilisateur. Quand l'icône est relâchée, le système anime lentement le déplacement de l'utilisateur de l'endroit actuel au nouvel endroit indiqué par l'icône (voir la figure 2.b).

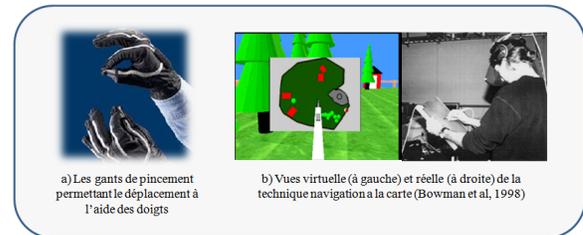


FIG. 2: Exemple de techniques de navigation libre.

La vitesse de déplacement : Outre sa direction, le déplacement se caractérise par une vitesse instantanée qui peut être calculée de plusieurs manières différentes. Mine et associés [54] ont proposé une technique qui utilise les deux mains pour le déplacement. En effet, il est possible de déterminer à la fois la direction du mouvement et sa vitesse. Le principe de cette technique repose sur la connaissance de la position des deux mains. La vitesse sera calculée en fonction de l'écartement entre les deux mains : plus la distance est grande, plus le déplacement est rapide. Cette technique est cognitivement difficile car l'utilisateur aura des difficultés à contrôler la vitesse de son déplacement grâce à l'écartement entre ses deux mains. Une autre approche, proposée par Yan et associés [82] repose sur le principe de la marche réelle de l'utilisateur. La vitesse est calculée en fonction de la vitesse de la montée ou de la descente des genoux. Les déplacements de type marche sont aussi pris en compte par cette approche. Il y a un fort parallèle entre le déplacement dans la scène virtuelle et la marche réelle. Les techniques de navigation qui utilisent le concept de la marche réelle sont plus faciles à utiliser du fait que l'utilisateur ne fournit aucun effort cognitif pour comprendre le fonctionnement de la technique. Selon une étude réalisée par Ushoh et associés [77] les résultats sont meilleurs lorsque la métaphore utilisée pour la navigation est proche de la marche réelle, car la marche donne une meilleure sensation de présence et d'immersion.

Déplacement du point de vue Stoackley et associés [72] proposent à l'utilisateur de manipuler directement son point de vue, en le déplaçant comme on déplace un objet dans l'environnement virtuel. Cette métaphore est appelée « Monde-En-Miniature » (*World-In-Miniature* « WIM »). Pour cela, l'utilisateur dispose d'une maquette virtuelle (une représentation miniature du monde virtuel) qu'il tient dans sa main. Le mouvement de l'utilisateur dans le monde virtuel suit celui de son avatar miniature dans le monde miniature. Au lieu de représenter toute la scène virtuelle en miniature, Elvins et associés [25] proposent de ne représenter qu'une partie du monde virtuel en miniature afin de permettre à l'utilisateur de trouver facilement son chemin. Cette technique repose sur le principe des *wordlets* qui sont des représentations miniatures de plusieurs parties de l'environnement virtuel.

4.1.2 La navigation assistée

Lorsque l'utilisateur connaît sa cible, c'est-à-dire la destination de son déplacement, il est possible de l'assister afin de le décharger de certaines tâches pendant le processus de navigation. Pour cela, l'utilisateur peut se servir d'une liste ou d'un menu, dans lequel il peut sélectionner son choix. Stoackley et associés [72] proposent d'utiliser un monde en miniature pour sélectionner la destination sur la maquette du monde virtuel. La maquette joue le rôle de carte 3D détaillée, dans laquelle l'avatar de l'utilisateur se déplace et s'oriente selon la destination déterminée. Dans ce cas, le chemin à suivre est déterminé automatiquement par le système (voir la figure 3.a). Igarashi et associés [39] proposent une autre méthode qui permet à l'utilisateur de dessiner son chemin souhaité à l'aide d'un stylo sur une plaque en plexiglas (voir la figure 3.b). Sternberger et associés [71] utilisent un rayon virtuel déformable pour dessiner librement le chemin à suivre pendant la navigation. Le but de cette interaction à deux mains est d'éviter les obstacles qui se dressent devant l'utilisateur et de modifier finement la direction et la vitesse courante. Le chemin parcouru est sous forme d'une courbe 3D.

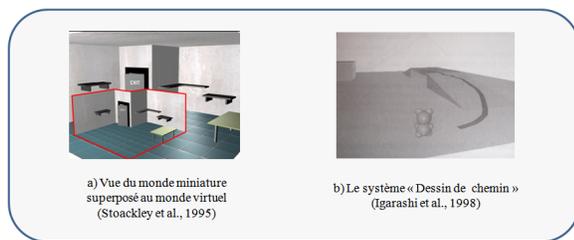


FIG. 3: Exemples de techniques de navigation assistée.

Une fois la destination connue, il suffit juste de déplacer l'utilisateur jusqu'à l'endroit souhaité. Il existe plusieurs méthodes pour transporter l'utilisateur dans un environnement virtuel, parmi elles la « téléportation » qui déplace l'utilisateur d'une manière instantanée. Cette méthode présente un inconvénient majeur puisqu'elle désoriente l'utilisateur car elle ne donne pas d'information sur la distance parcourue pendant le trajet. Pour pallier ce problème, Butterworth et associés [16] proposent de faire parcourir virtuellement le chemin à l'utilisateur (c'est-à-dire faire voler l'utilisateur jusqu'à la destination).

4.2 La sélection

L'action « sélectionner un objet » est une tâche très courante dans la vie quotidienne. En effet pour pouvoir manipuler un objet, l'être humain a toujours besoin de le prendre dans sa main ou de le désigner parmi d'autres objets. Le processus de sélection en RV s'inspire souvent de la sélection dans le monde réel. La tâche de sélection, appelée aussi tâche d'acquisition d'une cible [85], représente la désignation d'un objet ou d'un ensemble d'objets afin d'accomplir un objectif donné au sein de l'environnement virtuel [5]. Mais comment indiquer au système qu'un objet a été sélectionné? La validation de sélection est l'action qui suit la tâche de désignation. Elle peut être indiquée de plusieurs façons suivant la technique de sélection utilisée et l'environnement dans lequel l'utilisateur évolue. Par exemple, on peut presser un bouton, utiliser un geste ou encore utiliser une commande vocale, mais la validation pourrait être faite automatiquement si le système d'interaction prend en considération les intentions des utilisateurs. Dans le cas de notre étude, nous considérons la sélection comme la tâche qui regroupe deux sous-tâches à savoir la désignation d'un objet ou d'un ensemble d'objets appartenant à une scène virtuelle

et la validation de la sélection.

4.3 La manipulation

La navigation ou la sélection sont des tâches qui permettent à l'homme d'avoir l'illusion d'habiter un monde virtuel, de voyager au sein de celui-ci et même d'atteindre et toucher les objets appartenant à ce dernier. Dans la plupart de ces cas, l'homme reste toujours un spectateur immergé dans son environnement virtuel. La tâche de manipulation quant à elle permet à l'utilisateur d'être un acteur capable de changer les propriétés de l'environnement virtuel. Elle représente la composante active de tout système interactif. Elle peut être définie comme un processus complexe qui consiste à modifier les propriétés d'un objet ou d'un ensemble d'objets appartenant à l'univers virtuel. Ces propriétés sont, par exemple, la position, l'orientation, la couleur, l'échelle et la texture. Il existe deux types de manipulations en RV : la manipulation directe et la manipulation indirecte. Le type de manipulation dépend de la technique utilisée. La manipulation directe est celle pour laquelle l'utilisateur agit directement sur l'objet appartenant à l'environnement virtuel. La manipulation indirecte, quant à elle, est celle pour laquelle l'utilisateur agit sur les composantes du monde virtuel par l'intermédiaire d'entités graphiques (boutons, menus 3D) ou matérielles.

La tâche de manipulation est intimement liée à la tâche de sélection, car on ne peut pas manipuler un objet sans l'avoir sélectionné préalablement.

4.4 Classification des techniques d'interaction pour la sélection et la manipulation

Malgré le grand nombre des techniques de sélection et de manipulation existantes aujourd'hui, la conception et la modélisation d'une technique d'interaction 3D efficace reste un problème de recherche très important auquel les chercheurs essaient de répondre. Barfield et associés définissent très bien le défi de la recherche dans ce domaine [3]. Ces derniers évoquent le problème de la projection géométrique du corps de l'utilisateur et des objets de l'environnement réel dans un environnement virtuel.

Depuis, les chercheurs n'ont pas cessé d'étudier l'interaction 3D, les techniques qui lui sont associées et surtout comment rendre l'interaction avec les environnements virtuels la plus efficace et la plus naturelle possible.

Il existe deux classifications de base des techniques de sélection et de manipulation : la classification par décomposition en tâche et la classification par métaphore.

Dans le cas de la classification par décomposition en tâche, les techniques de sélection et de manipulation se composent de plusieurs blocs (appelés *building block* en anglais) [5]. Chaque bloc se charge d'exécuter une action élémentaire pendant le processus d'interaction. Une action élémentaire peut être assurée par plusieurs composants différents qui appartiennent au même bloc.

Dans le cas de la classification par métaphore, les techniques de sélection et de manipulation sont divisées en deux grandes familles en fonction de la position et de la distance utilisateurs-objets virtuels [61][62][60] : les techniques *exocentriques* pour lesquelles le monde virtuel est contrôlé depuis l'extérieur et les techniques *égocentriques* pour lesquelles l'utilisateur agit directement depuis l'intérieur de l'environnement virtuel. Cette dernière catégorie est composée de deux sous-familles : les techniques basées sur la métaphore de la *main virtuelle* et les techniques basées sur la métaphore du *pointeur virtuel*.

Dans ce qui suit, nous présentons les techniques de sélection et/ou de manipulation selon la classification par métaphores. Nous précisons à chaque fois si la technique dont nous parlons est une

technique de sélection ou de manipulation.

4.5 Les techniques de sélection et de manipulation

4.5.1 Les techniques egocentriques

En s'inspirant de la réalité, l'utilisateur peut utiliser sa propre main pour sélectionner un objet virtuel, nous parlons dans ce cas de préhension. Sturman et associés [74] proposent une technique de sélection basée sur la métaphore de la main virtuelle. Dans cette technique, l'utilisateur touche l'objet virtuel avec sa main réelle pour le désigner, puis valide la sélection, soit en fermant le poignet, soit en restant en contact avec l'objet un certain temps. Cette technique est très simple, naturelle et intuitive mais elle pose le problème de la sélection des objets distants. Dans ce cas, l'utilisateur doit se déplacer jusqu'à se trouver à portée de l'objet pour pouvoir le désigner directement avec sa main. Pour pallier ce problème, Poupyrev et associés [61] ont proposé la technique du Go-Go, appelée également technique d'extension du bras. Elle repose sur le même principe que la technique précédente, c'est-à-dire toucher l'objet virtuel pour le sélectionner. Elle est basée également sur la métaphore de la main virtuelle (la main réelle est représentée par une main virtuelle dans l'environnement). La position de la main virtuelle est calculée par une fonction non-linéaire, de sorte à ce que la main virtuelle aille plus loin que la main réelle après avoir atteint une certaine distance « seuil D ». L'utilisateur dispose ainsi d'un bras virtuel plus long que son bras réel, lui permettant d'atteindre des objets distants. Cette technique reste tout de même limitée pour la sélection des objets petits et distants. La figure 4.a montre le relation entre la distance parcourue par la main physique de l'utilisateur (distance réelle Rr représentée en des abscisses) et la distance parcourue par la main virtuelle (distance virtuelle Rv représentée en des coordonnées). La technique du GoGo est aussi une technique de manipulation. L'utilisateur agit directement avec sa main virtuelle sur les objets du monde. En effet, lorsque l'objet est sélectionné, il est attaché à l'avatar de l'utilisateur et il hérite des mouvements de la main virtuelle. A la fin du processus de manipulation, l'objet manipulé est relâché et re-attaché au monde virtuel avec ses nouvelles propriétés (position et/ou rotation en général).

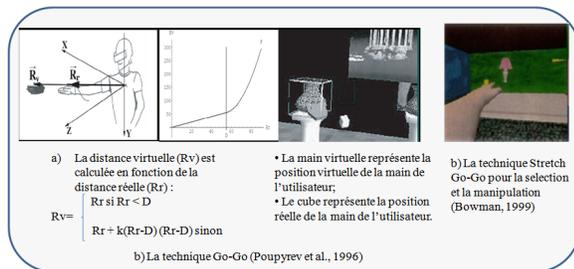


FIG. 4: La technique GoGo et ses variantes.

Il existe deux variantes du Go-Go : le Fast Go-Go et le Stretch Go-Go [8] (voir la figure 4.b). Dans le cas du Fast Go-Go, la position virtuelle est calculée par une fonction non linéaire comme dans le Go-Go mais sans la valeur seuil D (D=0). De fait, le bras virtuel s'allonge très rapidement dès le début du mouvement. La technique Stretch Go-Go définit trois zones autour de l'utilisateur : une zone proche, une zone intermédiaire et une zone distante. Lorsque la main physique est en zone proche, la main virtuelle s'approche à vitesse constante. Lorsqu'elle se trouve en zone intermédiaire, la main virtuelle s'arrête de bouger (repos). Enfin, en zone distante, le bras virtuel s'allonge à vitesse constante.

Frees et associés [29] ont proposé une technique de sélection/manipulation directe qui peut être utilisée comme complément aux techniques d'interaction manuelles telles que le Ray-casting afin d'améliorer la précision des mouvements de la main de l'utilisateur (voir la figure 5.b). En effet, les rotations et les translations se stabilisent lorsque les mouvements de la main ralentissent sous un certain seuil, diminuant automatiquement les effets des tremblements de la main dans le cas des manipulations précises. La figure 5.a montre les étapes de translation avec la technique PRISM¹ [29].

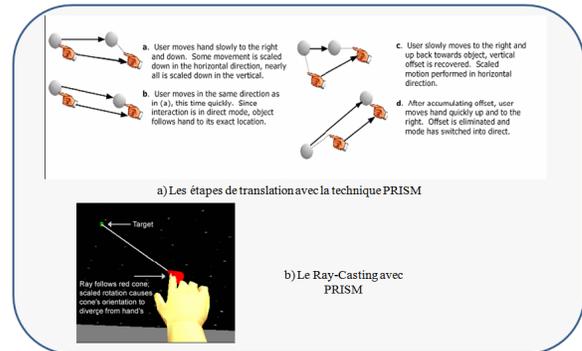


FIG. 5: La technique PRISM (Extrait de (Frees et al., 2005)).

Lorsque les objets virtuels ne sont pas à portée de la main de l'utilisateur, ce dernier peut les sélectionner à distance grâce à des techniques qui utilisent la métaphore du rayon virtuel (rayon laser). Une des premières techniques imaginées pour l'interaction avec des mondes virtuels est le Ray-Casting. Elle a été introduite par Bolt en 1980 [4] puis reprise et enrichie par plusieurs auteurs. Le Ray-Casting est une technique de pointage basée sur la métaphore du rayon virtuel. Un rayon laser infini part de la main virtuelle et traverse tout le monde virtuel (voir la figure 6.a). Le premier objet intersecté dans le monde sera apt à être sélectionné. Contrairement aux autres techniques de sélection qui exigent au minimum 3 degrés de liberté pour l'utilisation, le Ray-Casting n'exige que 2 degrés de liberté.

Parmi les variantes du Ray-Casting, nous citons celle de Zhai et associés [85] qui ont ajouté un curseur tridimensionnel semi transparent au bout du rayon laser. L'objectif de ce curseur est de bien distinguer le rayon virtuel dans la scène. Cette variante tire parti de la loi de Fitts, qui dit que le temps de sélection diminue lorsque la surface à sélectionner augmente. Par la suite, De Amicis et associés [21] remplacent le curseur par un volume sphérique. Les techniques basées sur la métaphore du pointeur virtuel ont l'avantage d'être simples cognitivement et facile à utiliser, mais présentent un inconvénient majeur pour la sélection des objets de petite taille ou distants. Liang et associés [47] proposent d'utiliser un cône à la place du rayon (voir la figure 6.b) pour résoudre ce problème. En effet, si les objets éloignés deviennent petits avec la distance, alors l'outil de sélection doit être plus grand pour pouvoir les sélectionner facilement. Par la suite Forsberg et associés [28] proposent de pouvoir modifier l'angle d'ouverture du cône en fonction de la position des objets à sélectionner dans l'environnement. Pour les objets éloignés, le cône de sélection doit être plus large que pour les objets proches. Cette technique est appelée le laser à ouverture. La plupart des techniques de pointage sont des techniques de sélection.

Pendant le processus de sélection, l'utilisateur peut rencontrer des obstacles qui cachent les objets qu'il veut sélectionner. Pour

¹Precise and Rapid Interaction through Scaled Manipulation

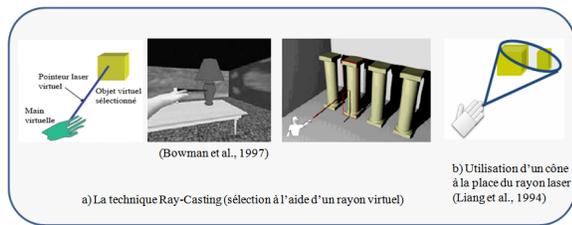


FIG. 6: Quelques techniques basées sur la métaphore du pointeur virtuel.

éviter cette difficulté, Olwal et associés [55] ont proposé la technique du pointeur flexible, qui est une extension du rayon virtuel avec la possibilité de pointer plus facilement des objets cachés par d'autres objets de l'environnement (voir la figure 7). En effet, le rayon peut être dirigé dans l'espace afin d'éviter les obstacles. La courbure et la longueur du rayon sont contrôlées à l'aide des deux mains. D'autres chercheurs préfèrent éliminer des objets non désirables [69], c'est-à-dire les objets que l'utilisateur ne veut pas sélectionner. Pour ce faire, l'utilisateur tient en main une lampe de poche virtuelle qui va éclairer certains objets, qui sont considérés comme potentiellement sélectionnés. Pour réduire le nombre des objets sélectionnés, c'est-à-dire les objets appartenant au faisceau projeté par la lampe dans le monde virtuel, l'utilisateur va faire sortir du faisceau les objets indésirables en effectuant des mouvements avec la lampe. Cette technique de sélection est efficace et évite les erreurs de sélection mais elle présente néanmoins un inconvénient majeur puisque l'utilisateur change les propriétés de l'environnement, en supprimant les objets indésirables, pour sélectionner d'autres objets.

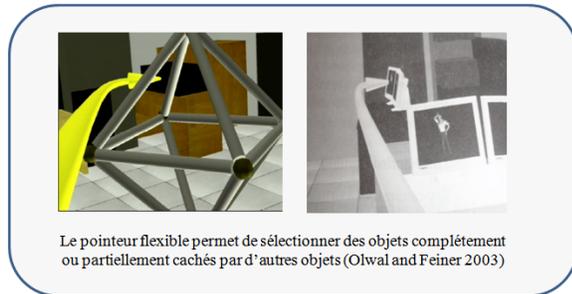


FIG. 7: La technique rayon flexible.

Il existe des techniques de sélection indirecte, qui permettent à l'utilisateur de désigner ou d'indiquer des objets à distance. Ces techniques utilisent la métaphore dite « dirigée du doigt » [58]. Cette métaphore nécessite que l'index soit repérable dans l'espace virtuel en utilisant un capteur de position attaché au doigt ². En effet, les objets sont sélectionnés à l'aide d'un rayon virtuel, qui part de la tête de l'utilisateur et passe par l'index de sa main (voir la figure 8.a). Une autre variante de cette métaphore est la direction du regard ³ [75]. Dans ce cas, l'utilisateur pointe les objets qu'il veut sélectionner avec son regard. La tête de l'utilisateur doit être repérable dans le monde virtuel. Cette technique présente un problème majeur car les yeux de l'utilisateur sont complètement monopolisés durant le processus de sélection. Pierce et associés [58] proposent une autre technique de sélection qui utilise les mouvements de la main pour sélectionner des objets. L'utilisateur

²Sticky Finger
³Gaze Directed

utilise son pouce et son index ⁴ pour saisir l'objet cible et le prendre, comme s'il agissait sur l'image perçue plutôt que sur l'objet réel (voir la figure 8.b). D'autres techniques basées sur le même principe ont été proposées. Parmi elles, la technique des mains encadrantes ⁵ [58] dans laquelle les deux mains sont utilisées pour former un cadre de sélection (voir la figure 8.c). Certains auteurs matérialisent ce cadre par une plaquette de plexiglas que l'utilisateur tient dans sa main non dominante [66]. L'utilisateur sélectionne les objets qui l'intéressent en les entourant simplement. Pierce et associés [58] proposent un autre paradigme de sélection, nommé la Paume à plat ⁶. L'utilisateur met sa paume devant lui pour indiquer les objets qu'il veut sélectionner (voir la figure 8.d). Les techniques de sélection par indication appartiennent à la métaphore « Image Plane ». L'utilisateur agit sur les images 2D des objets virtuels. Les techniques d'interaction basées sur la métaphore Image Plane sont dans la plupart des cas des techniques dédiées à la sélection.

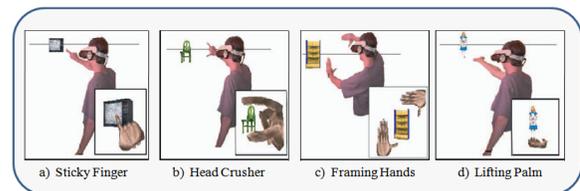


FIG. 8: Exemples de techniques de sélection par indication.

Un autre exemple de techniques de manipulation directe est la technique de Kitamura et associés [44] qui utilise des baguettes chinoises, permettant de saisir, déplacer et tourner les objets. Par exemple, l'une des baguettes peut servir d'axe de rotation tandis que l'autre indique l'amplitude de la rotation (voir la figure 9). Pour les différentes techniques de manipulation que nous venons de citer, l'utilisateur agit directement sur les objets virtuels. Ware et associés [79] utilisent des objets réels, de formes similaires aux objets virtuels, sur lesquels ils effectuent des manipulations. L'utilisateur dispose d'un retour tactile cohérent par rapport à ce qu'il fait dans l'environnement (déplacer un objet) et ce qu'il ressent (l'objet dans sa main). De la même façon, Hachet [36] se sert d'un dispositif sous forme de volant, nommé le CAT, tenu à deux mains pour manipuler les objets d'une scène.

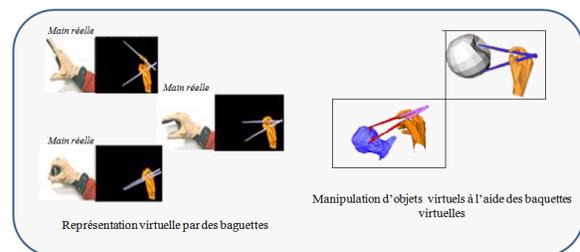


FIG. 9: La manipulation par baguettes chinoises.

4.5.2 Les techniques exocentriques

Dans le cas de l'interaction exocentrique, l'utilisateur interagit avec l'environnement 3D de l'extérieur de celui-ci. En effet,

⁴Head Crusher
⁵Framing Hands
⁶Lifting Palm

l'utilisateur est considéré comme un acteur qui ne fait pas partie de la scène virtuelle, mais il a tout de même le pouvoir d'agir sur les entités du monde virtuel.

Stoackley et associés [72] proposent une des premières métaphores de sélection et de manipulation qui reposent sur le principe de l'interaction exocentrique, appelée « monde-en-miniature », qui utilise une représentation miniature de la scène virtuelle pour permettre à l'utilisateur d'agir indirectement sur les objets du monde virtuel (voir la figure 10.a). Chacun des objets dans le monde en miniature peut être sélectionné en utilisant la métaphore de la main virtuelle simple. L'utilisateur tient dans sa main non dominante une maquette de la scène et sélectionne (et/ou manipule) les objets avec sa main dominante. L'inconvénient majeur de l'utilisation de la maquette miniaturisée du monde virtuel est la désignation et la manipulation des objets qui sont petits à l'origine. Pour pallier ce problème, Pierce et associés [59] ont proposé la technique des Poupées Vaudou (voir la figure 10.b). Cette dernière offre à l'utilisateur la possibilité de créer ses propres objets miniatures du monde virtuel, qui sont nommés « poupées ». Dans le cas de la manipulation, l'utilisateur désigne l'objet qu'il souhaite manipuler grâce à la technique « *head crusher* » [58]. À ce moment, une maquette miniature de l'objet et de son environnement proche est alors créée dans la main non dominante. La main dominante sert à déplacer et à tourner la miniature créée. Cette technique permet la manipulation d'objets de tailles variées à proximité de soi.



FIG. 10: Exemples de techniques d'interaction exocentriques.

4.5.3 Les techniques hybrides

Jusqu'ici nous avons évoqué des techniques de sélection et/ou de manipulation simples, cependant il existe d'autres types de techniques dites hybrides basées sur les deux métaphores. Parmi ces techniques, nous citons la technique HOMER⁷ [9] qui allie la rapidité de la technique Ray-Casting pour la sélection et la précision de la technique Main Virtuelle Simple pour la manipulation. Cette technique est basée sur les travaux de Wloka et associés [81] et de Mine [52]. Après la sélection d'un objet à l'aide du Ray-Casting, la main virtuelle se déplace automatiquement jusqu'à l'objet qui sera attaché à cette dernière. Une fois que la manipulation est terminée, la main virtuelle reprend sa position initiale et l'objet manipulé garde sa position finale (voir la figure 11.a). La technique « changement d'échelle » [54] est une autre technique hybride qui utilise la technique direction du regard pour la sélection. Lorsqu'un objet virtuel est sélectionné dans le plan image, le système agrandit l'utilisateur ou réduit l'objet de telle sorte à ce que la main virtuelle puisse toucher vraiment l'objet occulté (voir la figure 11.b). Si l'utilisateur ne bouge pas et que la visualisation n'est pas stéréoscopique, on ne voit pas la différence entre avant et après le changement d'échelle. Cependant, quand l'utilisateur commence à déplacer l'objet et/ou sa tête, il se rend compte qu'il est géant par rapport au monde qui lui apparaît minuscule et qu'il peut manipuler directement des objets

⁷Hand-centered Object Manipulation Extending Ray-casting

sélectionnés comme dans la technique Main Virtuelle Simple.

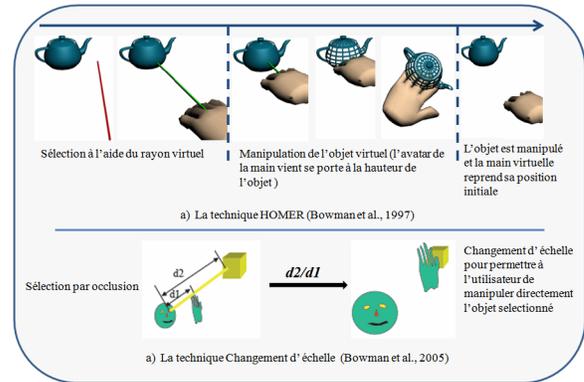


FIG. 11: La technique HOMER.

4.6 Le contrôle d'application

Le contrôle d'application ou système de commande est une tâche qui permet d'exécuter une commande dans le but de changer le mode d'interaction et/ou l'état du système. Cette tâche regroupe toutes les techniques de manipulation indirecte sur l'application, l'environnement et/ou les données. Bowman et associés [5] définissent le contrôle d'application comme étant les changements de l'état du système ou le mode d'interaction. La tâche contrôle d'application se situe à un niveau conceptuel différent des trois autres tâches. L'utilisateur agit sur l'application en utilisant les services assurés par l'application elle-même.

Dans les interfaces 2D, le contrôle d'application peut se résumer à un simple clic sur une icône ou un menu. Il peut être considéré comme un outil de communication entre l'homme et l'application. Dans le cas d'une interface 3D, on ne peut pas utiliser les techniques classiques pour interagir avec l'application, car la souris ou le clavier ne sont pas utilisables. En effet, l'utilisateur doit considérer plusieurs degrés de liberté pour la sélection. Les dispositifs d'entrée/sortie sont nombreux et différents de ceux utilisés en 2D. C'est pour ces raisons que des techniques de contrôle du système plus adaptées aux interfaces 3D ont vu le jour. Bowman et associés [5] définissent le contrôle du système comme la tâche utilisateur qui permet d'exécuter une application particulière du système, de changer le mode d'interaction et/ou l'état du système.

Depuis les premiers ordinateurs, les interfaces graphiques ont considérablement évolué; actuellement, elles sont plus ergonomiques, plus faciles d'utilisation et même plus esthétiques. Cependant, l'application de ces concepts aux environnements virtuels n'est pas évidente. En effet, les conditions d'utilisation dans les deux types d'environnements 2D et 3D ne sont pas les mêmes. Dans un environnement 3D, l'utilisateur dispose de plusieurs degrés de liberté contrairement à une interface 2D où un degré de liberté peut suffire pour interagir avec l'environnement de travail. Dans ce qui suit, nous présentons uniquement les techniques de contrôle d'application destinées aux interfaces 3D.

Les premiers travaux de réflexion sur les techniques de contrôle du système en RV proposent d'étendre ou d'adapter certains widgets 2D à la 3D. Brookshire Conner et associés [13] définissent un widget comme étant une combinaison de géométrie et de comportement. Ils construisent par la suite une bibliothèque de composants tels que sélecteur de couleurs ou une sphère contrôlant les rotations.

Jacoby et associés [40] proposent un menu déroulant 2D nommé "menu 2D converti" qui est librement positionnable et orientable dans l'espace. L'utilisateur sélectionne et active un élément dans le

menu en utilisant la métaphore du pointeur virtuel, en le pointant du doigt (voir la figure 12). Ce concept a été repris et amélioré par Darken et associés [19] en ajoutant de la transparence aux menus ainsi qu'un retour haptique pour faciliter la manipulation. Ce concept peut être appliqué à n'importe quel widget destiné aux interfaces 2D. Dans le cas de la RV, l'utilisateur peut organiser son environnement en trois dimensions au lieu de deux.

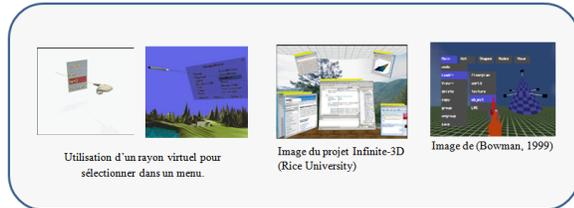


FIG. 12: Exemple de menus 2D adaptés aux environnements 3D.

Le menu TULIP [10] est un menu déroulant basé sur l'utilisation des doigts. La main de l'utilisateur est équipée d'un gant de données et chaque doigt correspond à un élément du menu (voir la figure 13.a). L'utilisateur peut sélectionner un élément du menu en pinçant avec le pouce le doigt correspondant à l'élément voulu. Lorsque le nombre d'éléments d'un menu est supérieur à quatre, il est possible d'utiliser soit les deux mains, soit d'organiser les menus en sous-menus. Cette technique permet une sélection à la fois très précise et rapide. Elle est intéressante car elle exploite pleinement le côté proprioceptif de la main. L'utilisateur n'a pas besoin de regarder ses doigts pour savoir lequel va se plier : une fois que les menus sont mémorisés, la sélection peut se faire en aveugle. Par contre, cette technique n'est pas adaptée à des menus de taille importante.

Le menu C3⁸ proposé par Grosjean et associés [35] [34] utilise le concept des Marking Menus. Ce dernier propose de disposer les menus en cube plutôt qu'en liste pour en accélérer l'accès. Le menu est composé de 27 boîtes réparties en 3x3x3 boîtes. Le but de cette représentation est de permettre à l'utilisateur de sélectionner une commande en faisant simplement un geste dans la bonne direction (voir la figure 13.b). Le C3 se présente à l'utilisateur comme une sorte de Rubik's Cube. Chacune des 26 boîtes disponibles peut contenir une commande, la 27^{ème} boîte, celle du centre du cube, est réservée à l'action spéciale d'annuler le menu. La main de l'utilisateur est représentée par un petit curseur, toujours initialisé au centre du cube. Ainsi, l'utilisateur n'a qu'à effectuer un geste dans la direction de l'élément souhaité, puis relâcher le bouton périphérique pour effectuer l'action correspondante. Cette technique donne d'excellents résultats en termes de rapidité de sélection, et ne génère que peu de sélections erronées.

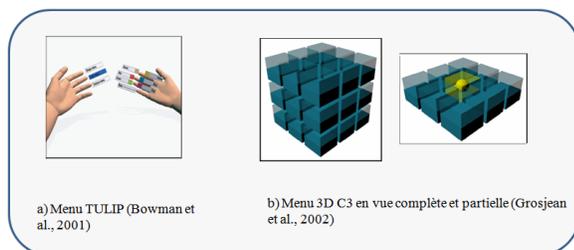


FIG. 13: Exemple de menus 3D.

⁸Command and Control Cube

Les menus circulaires sont un autre exemple de menus largement utilisés en RV. Les différents éléments sont placés sur un cercle. La sélection s'effectue soit par mouvement dans la direction d'un élément à partir du centre, soit par rotation du disque de manière à apporter l'élément d'intérêt dans la zone de sélection. Ce concept n'est pas propre à la RV, mais emprunté aux interfaces 2D. La figure 14 montre quelques exemples de formes de menus circulaires.

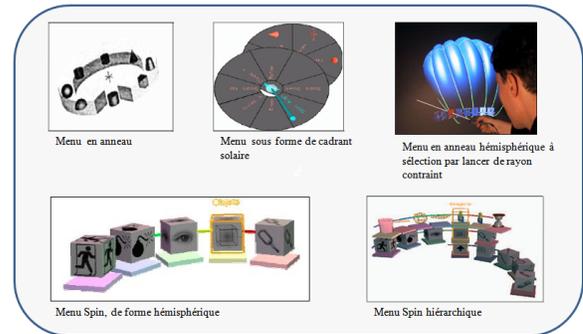


FIG. 14: Exemples de menus circulaires.

Kurtenbach et associés [45] ont proposé une technique qui permet de sélectionner un élément dans un menu circulaire en ne faisant qu'un mouvement avec la main sous forme d'un trait dans la direction de l'élément souhaité. Ainsi, ils montrent l'efficacité et le gain en performance de la disposition circulaire. Ce concept a été repris et adapté pour les environnements virtuels. Le menu est sous forme d'un triangle et ces éléments sont répartis autour d'un point central. La manipulation est ainsi plus efficace par rapport à un menu linéaire, car les éléments sont équidistants du centre. Ce concept présente des limitations par rapport à la taille maximale du menu. Deering [22] vient apporter une amélioration notable à ces menus, en adaptant ces derniers pour être hiérarchiques et permettre ainsi un nombre plus important de choix. L'inconvénient des menus hiérarchiques est la place qu'ils occupent à l'écran. Ce dernier remplace intégralement la scène durant sa manipulation. Liang et associés [47] utilisent les menus circulaires, sans hiérarchie. A la différence des autres menus circulaires, dans ce cas, les éléments sont disposés en cercle autour d'un axe vertical. Le menu est alors représenté par un anneau avec un trou au milieu. L'élément en face de l'utilisateur représente l'élément actif. Pour changer ce dernier, l'utilisateur doit tourner l'anneau selon un axe prédéfini. L'idée de cette technique a été reprise par Gerber et associés [33], mais au lieu d'afficher un cercle complet devant la main de l'utilisateur, une partie de la roue est montrée. L'utilisateur sélectionne un élément en tournant son poignet. La sélection avec ce menu est très rapide et peut se faire en aveugle. Par la suite, les mêmes auteurs proposent une autre version hiérarchique de ce menu. Wesche et associés [80] proposent une technique hybride qui utilise un menu circulaire et une sélection par pointage. Chaque élément est symbolisé par une icône. Les différentes icônes sont disposées devant l'utilisateur selon une portion d'arc de cercle. La sélection se fait à l'aide d'un rayon virtuel.

5 BILAN ET ANALYSE

Malgré que la recherche dans le domaine de l'interaction 3D soit sensiblement réduite ces derniers temps, cette dernière ne manque pas d'intérêts et d'objectifs. Cela se justifie par une importante communauté mondiale de chercheurs qui compte 350 membres dans au moins 28 pays [6].

Si nous supposons que cette réduction est due au fait que la plupart des techniques d'interaction 3D, les plus importantes et les plus innovantes, ont été découvertes jusqu'ici, alors on aurait trouvé un boom d'applications concrètes et utilisables dans le monde réel, impliquant l'interaction 3D. Malheureusement, ceci ne semble pas être le cas.

Bien qu'il n'y ait pas eu d'autres études sur les applications des environnements virtuels depuis celle de Brooks en 1999 [11], les chercheurs dans ce domaine pensent que l'interaction 3D est loin d'avoir atteint le sommet de son succès. Ce manque d'applications concrètes et réelles, qui exploitent l'interaction 3D, peut s'expliquer par le fait que [6] :

- La recherche dans ce domaine n'est pas totalement aboutie. Il y a des techniques fondamentales de l'interaction 3D qui n'ont pas encore été inventées jusqu'à ce jour. L'utilisation de ces techniques ouvrira peut être la porte à des applications réelles ;
- Les résultats de la recherche dans ce domaine ne sont pas connus par les industriels ou au contraire, ces derniers ignorent complètement ces résultats.

En ce qui nous concerne, nous pensons que la plupart des techniques d'interaction 3D existantes traitent l'interaction d'un point de vue général et ne peuvent pas répondre aux exigences de certaines applications telles que la téléopération, qui est un domaine qui exploite les réalités virtuelle et augmentée mais qui est très pauvre en termes d'interaction 3D.

La téléopération consiste en la commande et la manipulation des systèmes robotiques à distance. Ce mode de contrôle permet d'effectuer des tâches complexes, voire impossible pour l'homme dans le monde réel. En effet, la téléopération permet d'effectuer des interventions en milieu hostile, tels que des manipulations basiques connues et maîtrisées par l'homme. Les domaines d'application de la téléopération sont très variés et touchent la plupart des grands thèmes de recherche (médicale, spatiale, etc).

Les tâches de téléopération sont souvent des tâches complexes et doivent respecter un certain nombre de contraintes, qui sont : des saisies très précises des objets, des sélections et des manipulations sécurisées et une faible charge cognitive pendant l'utilisation.

Nous avons effectué une étude comparative des techniques de sélection et de manipulation en prenant en considération les contraintes exigées par des applications complexes telles que la téléopération, à savoir la *précision*, la *sécurité* et la *charge cognitive*. Le tableau 1 présente une comparaison des facteurs de performances pour les techniques de sélection et de manipulation. Nous remarquons qu'en général, les techniques existantes ne garantissent pas la précision et la sécurité de la sélection et de la manipulation. Rajoutons à cela, la forte charge cognitive que nécessitent l'apprentissage et l'utilisation de la plupart de ces techniques. Nous pouvons conclure que les techniques de sélection et de manipulation classiques ne peuvent pas être utilisées à l'état brut pour interagir avec des environnements complexes qui peuvent être des environnements mono ou multi utilisateurs.

Afin de remédier à ce manque de précision, de sécurité et d'augmentation de la charge cognitive lors de l'utilisation des techniques de sélection et de manipulation, une solution serait de proposer un système d'assistance à l'interaction 3D. Cette idée a été exploitée par Ouramdane et associés [57] [56] lors d'une étude centrée sur l'analyse de l'utilisateur et de son comportement à l'intérieur de la scène virtuelle. L'objectif de cette analyse est de concevoir un système d'interaction 3D capable d'aider un utilisateur en situation d'interaction 3D. En effet, si le système est

Technique de Sélection/Manipulation	Facteurs de performance		
	Précision	Sécurité	Charge cognitive faible
Ray-Casting	-	-	+
Flashlight	-	-	+
Main Virtuelle Simple	-	-	+
Go-Go	-	-	-
Monde-En-Miniature	+	-	-
PRISM	+	-	-
HOMER	-	-	+
StickyFinger	-	-	-

TAB. 1: Comparaison des facteurs de performance pour les techniques de sélection et de manipulation (avec (+) : facteur garanti et (-) : facteur non garanti).

capable de comprendre le comportement de l'utilisateur au sein du monde virtuel, alors il pourra prédire ses intentions et ainsi l'assister pour réaliser ses objectifs en mettant à sa disposition différents outils d'assistance.

dans ce contexte, une technique basée sur ce concept d'assistance appelée *Follow-Me* [57] a été proposée. Elle vient compléter les techniques d'interaction 3D classiques afin de rendre l'interaction plus simple et de décharger l'utilisateur de certains problèmes liés aux contraintes du matériel utilisé et la complexité des environnements dans lesquels l'utilisateur évolue.

Le concept d'assistance à l'interaction 3D peut être considéré comme un cadre ou un moule dans lequel une technique d'interaction 3D classique pourra être insérée pour pouvoir interagir efficacement et simplement avec des environnements complexes.

6 CONCLUSION

Cet article constitue une synthèse des travaux réalisés sur l'interaction 3D ces dernières années. Dans un premier temps, nous avons abordé le thème de la réalité virtuelle, ses définitions et ses composantes. Ces dernières concernent l'immersion, l'autonomie et l'interaction 3D. Ensuite, nous avons mis l'accent tout particulièrement sur l'interaction 3D, qui peut être considérée comme la composante motrice de tout système interactif. Elle se décline en quatre tâches de base : la navigation, la sélection, la manipulation et le contrôle d'application. A cet effet, nous avons proposé une revue des techniques d'interaction 3D utilisées par les communautés des réalités virtuelle et augmentée.

Aujourd'hui, il existe différentes techniques d'interaction 3D. Chacune d'elles est dédiée à une des quatre tâches de l'interaction, mais sans être rattachée à une application particulière. Dans la plupart des cas, l'interaction est traitée d'un point de vue général et la technique utilisée cherche à accomplir une tâche d'interaction sans prendre en considération les exigences de certaines applications, qui exploitent la réalité virtuelle et augmentée pour pouvoir interagir avec des environnements très complexes (virtuels ou réels augmentés) comme la téléopération par exemple. Pour ces différentes raisons, nous pensons que les techniques d'interaction existantes ne peuvent pas être utilisées à l'état brut pour interagir dans des environnements complexes.

Nous pensons que le développement d'un système d'assistance à l'interaction 3D est nécessaire pour améliorer les performances des tâches d'interaction 3D existantes. Dans ce cas, l'utilisateur sera assisté pendant qu'il interagit avec son environnement afin d'améliorer les performances de celui-ci au cours du processus d'interaction.

RÉFÉRENCES

- [1] M. Abendroth and J. Decock. Cyborgs et avatars. In *Revue d'architecture A+ 165*, <http://www.lab-au.com/files/doc/a41.html>, 2000.
- [2] S. Aukstakalnis and D. Blatner. Silicon mirage : The art and science of virtual reality. In *Peach Pit Press*, 1992.
- [3] W. Barfield, D. Zeltzer, T. Sheridan, and M. Slater. Presence and performance within virtual environments. In *Virtual environments and advanced interface design*, pages 473–513, 1995.
- [4] R. A. Bolt. Put-that-there : voice and gesture at the graphics interface. In *7th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 262–270, 1980.
- [5] A. Bowman, E. Kruijff, and I. Laviola, J. Poupyrev. *3D User Interfaces : Theory and Practice*. Addison-Wesley, 2005.
- [6] D. Bowman, J. Chen, C. Wingrave, J. Lucas, A. Ray, N. L. Q. Polys, Y. Haciahmetoglu, J. Kim, S. Kim, R. Boehringer, and T. Ni. New directions in 3d user interfaces. *International Journal of Virtual Reality*, 5 :3–14, 2006.
- [7] D. Bowman, D. Johnson, and L. Hodges. Testbed evaluation of ve interaction techniques. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST'99)*, ACM Press, pages 26–33, 1999.
- [8] D. A. Bowman. *Interaction Techniques for Common Tasks in Immersive Virtual Environments : Design, Evaluation, and Application*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 1999.
- [9] D. A. Bowman, D. Koller, and L. Hodges. Travel in immersive virtual environments : An evaluation of view-point motion control techniques. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, volume 7, pages 45–52, 1997.
- [10] D. A. Bowman and C. A. Wingrave. Design and evaluation of menu systems for immersive virtual environments. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pages 149–156, 2001.
- [11] F. Brooks. What's real about virtual reality? *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19 :16–27, 1999.
- [12] T. Brooks and A. Ince. Operator vision aids for telerobotic assembly and servicing in space. In *In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'1992*, pages 886–891, Nice, France, May 1992.
- [13] D. Brookshire Conner, S. S. Snibbe, K. P. Herndon, D. C. Robbins, R. C. Zeleznik, and A. van Dam. Three-dimensional widgets. *Proceedings of the 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics, Special Issue of Computer Graphics*, 26 :183–188, 1992.
- [14] G. Burdea and P. Coiffet. *La réalité virtuelle*, chapter 2, pages 243–251. Hermès-Paris, 1993.
- [15] J.-M. Burkhardt, B. Bardy, and D. Lourdeaux. Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. In *Psychologie Française*, pages 35–42, 2003.
- [16] J. Butterworth, A. Davidson, S. Hench, and M. Olano. 3dm : A three dimensional modeler using a head-mounted display. In *Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 135–138, 1992.
- [17] J. Casanueva and E. Blake. Presence and co-presence in collaborative virtual environments. Master's thesis, University of Cape Town, South Africa, 2000.
- [18] S. Coquillart, J. Grosjean, and A. Paljic. *Interaction 3D : Paradigmes et métaphores*. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [19] R. Darken and T. U. Naval Research Laboratory. Hands-off interaction with menus in virtual spaces. In S. S. Fisher, J. O. Merritt, and M. T. Bolas, editors, *Proceedings of SPIE : Visual Data Interpretation*, volume 2177, pages 365–371, 1994.
- [20] R. Darken and J. L. Sibert. A toolset for navigation in virtual environments. In *6th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 157–165, 1993.
- [21] R. De Amicis, M. Fiorentino, and A. Stork. Parametric in-teraction for cad application in virtual reality environment. In *International Conference on Design Tools and Methods in Industrial Engineering*, pages 43–52, 2001.
- [22] M. F. Deering. Holosketch : a virtual reality sketching/animation tool. In *Proceedings of CHI'95*, pages 220–226, 1995.
- [23] C. Dumas, P. Plénacoste, and C. Chaillou. Définition d'un modèle d'interaction pour une interface de travail tridimensionnelle à partir d'expérimentation. In *In Proceedings of IHM'99*, 1999.
- [24] S. R. Ellis. What are virtual environments? In *Proceedings of IEEE Computer Graphics et Applications*, pages 17–22. IEEE, 1994.
- [25] T. T. Elvins, D. R. Nadeau, and D. Kirsch. Worldlets : 3d thumbnails for 3d browsing. In *SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 163–170, 1998.
- [26] J. Foley, A. Van Dam, S. Feiner, and J. Hugues. *Computer graphics Principles and Practice*. Addison-Wesley, 2e edition, 1996.
- [27] J. Foley, V. Wallace, and P. Chan. The human factors of computer graphics interaction techniques. In *IEEE Computer Graphics & Applications*, pages 459–464, 1984.
- [28] 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*, pages 95–96, 1996.
- [29] S. Frees and G. Kessler. Precise and rapid interaction through scaled manipulation in immersive virtual environments. In *In IEEE Virtual Reality 2005*, pages 99–106, March 2005.
- [30] P. Fuchs. Les interfaces de la réalité virtuelle. In *Edition Interfaces, les journées de Montpellier*, 1996, 1996.
- [31] P. Fuchs, B. Arnaldi, and J. Tisseau. *La réalité virtuelle et ses applications*, chapter 1, pages 3–52. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [32] p. Fuchs, G. Moreau, G.-M. Burkhardt, and S. Coquillart. *le traité de la réalité virtuelle, volume 2 : L'interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel*. Edition Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2006.
- [33] D. Gerber. *Interaction 3D sur un plan de travail virtuel : Application aux déformations de forme libre*. PhD thesis, Université Louis Pasteur de Strasbourg 1, 2004.
- [34] J. Grosjean, J.-M. Burkhardt, S. Coquillart, and P. Richard. Evaluation of the command and control cube. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Multimodal Interfaces (ICMI 2002)*, IEEE Press, pages 14–16, 2002.
- [35] J. Grosjean and S. Coquillart, S. . Command & control cube : a shortcut paradigm for virtual environments. In *In Proceedings of IPT-EGVE'01*, 2001.
- [36] M. Hachet. *Interaction avec des environnements virtuels affichés au moyen d'interfaces de visualisation collective*. PhD thesis, Université Bordeaux I, 2003.
- [37] C. Hand. A survey of 3d interaction techniques. In *Proceedings of Computer Graphics Forum*, pages 269–281, 1997.
- [38] M. Heim, M. Featherstone and R. Burrows. The design of virtual reality. In *Cyberspace/Cyberbodies/Cyberpunk » Cultures of Technological Embodiment, London : Sage.*, pages 65–78, 1995.
- [39] T. Igarashi, R. Kadobayashi, K. Mase, and H. Tanaka. Path drawing for 3d walkthrough. In *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 173–174, 1998.
- [40] R. H. Jacoby and S. Ellis. Using virtual menus in a virtual environment. *Proceedings of SPIE : Visual Data Interpretation*, Alexander, editor, 1668 :39–48, 1992.
- [41] A. Kadri, A. Lecuyer, J. Burkhardt, and S. Richir. The influence of visual appearance of user's avatar on the manipulation of objects in virtual environments. In *IEEE International Conference on Virtual Reality*, pages 291–292, 2007.
- [42] A. Kadri, A. Lecuyer, and J.-M. Burkhardt. The visual appearance of user's avatar can influence the manipulation of both real devices and virtual objects. In *IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 2007. 3DUI'07*, 2007.
- [43] R. Kalawsky. Exploiting virtual reality techniques in education and training : Technological issues. In *SIMA Report*, 1996.
- [44] Y. Kitamura, T. Higashi, and F. Kishino. Virtual chopsticks : Object manipulation using multiple exact interactions. In *IEEE Virtual Reality*, pages 198–204, 1999.
- [45] G. Kurtenbach and W. Buxton. User learning and performance with marking menus. In *Proceedings of CHI'94*, pages 258–264, 1994.
- [46] J. Lanier. A vintage virtual reality interview. [Phttp://www.well.com/user/jaron/vrint.html](http://www.well.com/user/jaron/vrint.html), 1986.
- [47] J. Liang and M. Green. Jdcad : a highly interactive 3d modeling

- system. In *Computer Graphics (SIGGRAPH'93 Proceedings)*, pages 499–506, 1994.
- [48] J. Mackinlay, K. Stuart, and G. Robertson. Rapid controlled movement through a virtual 3d workspace. *Computer Graphics*, 24(4) :171–176, August 1990.
- [49] D. Mapes and J. Moshell. A two-handed interface for object manipulation in virtual environment. *Presence, Teleoperation and Virtual Environment*, 4(4) :403–416, 1995.
- [50] D. Mestre and P. Fuchs. *Immersion et Présence*. Le traité de la Réalité Virtuelle, 3eme Edition, Ecole des Mines de Paris, 2006.
- [51] P. Milgram and F. Kishino. A taxonomy of mixed reality visual displays. In *IEICE Transactions on Information and Systems (Special Issue on Networked Reality)*, E77-D(12) :1321–1329, 1994.
- [52] D. o. C. S. Mine, M. R. Isaac : A virtual environment tool for the interactive construction of virtual worlds. NC 27599-3175 TR95-020, Departement of Computer Science, University of North California, Chapel Hill, 1995.
- [53] M. R. Mine. Virtual environment interaction techniques. Chapel Hill, NC 27599-3175 TR95-018, Departement of Computer Science, University of North California, 1995.
- [54] M. R. Mine, J. F. P. Brooks, and C. H. Sequin. Moving objects in space : Exploiting proprioception in virtual-environment interaction. *Computer Graphics*, 31 :19–26, 1997.
- [55] A. Olwal and S. . Feiner. The flexible pointer : An interaction technique for selection in augmented and virtual reality. In *User Interface Software and Technology (UIST' 03) Conference Supplement, ACM Press*, pages 81–82, 2003.
- [56] N. Ouramdane, F. Davesne, S. Otmane, and M. Mallem. Evaluation of the follow-me technique for grabbing virtual objects in semi-immersive virtual environment. In *8th International Conference on Virtual Reality (VRIC 2006)*, pages 85–94, Laval, France, 2006.
- [57] N. Ouramdane, S. Otmane, F. Davesne, and M. Mallem. Follow-me : a new 3d interaction technique based on virtual guides and granularity of interaion. In *ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications (VRCIA 2006)*, pages 137–144, Hong Kong, China, 2006.
- [58] J. S. Pierce, A. Forsberg, M. J. Conway, S. Hong, R. Zeleznik, and M. R. Mine. Image plane interaction techniques in 3d immersive environments. In *Proceedings of 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 39–43, 1997.
- [59] J. S. Pierce, B. C. Stearns, and R. Pausch. Voodoo dolls : Seamless interaction at multiple scales in virtual environments. In *Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 141–146, 1999.
- [60] I. Poupyrev and T. Ichikawa. Manipulation object in virtual worlds : Categorization and empirical evaluation of interaction techniques. *Visual languages and Computing*, 10(1) :19–35, 1999.
- [61] I. Poupyrev, S. Weghorst, M. Billinghurst, and T. Ichikawa. The go-go interaction technique non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '96) Press*, pages 79–80, 1996.
- [62] I. Poupyrev, S. Weghorst, M. Billinghurst, and T. Ichikawa. Egocentric object manipulation in virtual environment : Empirical evaluation of interaction techniques. In *Computer Graphics Forum, EUROGRAPHICS'98 Issue*, pages 41–52, 1998.
- [63] H. Regenbrecht, M. Wagner, and G. Baratoff. Magicmeeting : A collaborative tangible augmented reality system. *Virtual Reality*, 6 :151–166, 2002.
- [64] H. Rheingold. Virtual reality. In *Simon & Schuster, Inc.*, 1991.
- [65] W. Robinett and R. Holloway. Implementation of flying, scaling and grabbing in virtual worlds. In *Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 189–192, 1992.
- [66] D. Schmalstieg, L. M. Encarnação, and . Szalavári, Z. p. 147-153. Using transparent props for interaction with the virtual table. In *Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 147–153, 1999.
- [67] M. Slater, A. Steed, J. McCarthy, and F. Maringelli. The influence of body movement on presence in virtual environments. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 40, 1998.
- [68] M. Slater, M. Usoh, S. Benford, D. Snowdon, C. Brown, T. Rodden, G. Smith, and S. Wilbur. Distributed extensible virtual reality laboratory (devrl) : a project for co-operation in multi-participant environments. In *Eurographics workshop on Virtual environments and scientific visualization*, pages 137–148, 1996.
- [69] A. Steed and C. Parker. 3d selection strategies for headtracker and non-head tracked operation of spatially immersive displays. In *Immersive Projection Technology*, 2004.
- [70] L. Sternberger. *Interaction en réalité virtuelle*. PhD thesis, Université Louis Pasteur de Strasbourg 1, 28 novembre 2006.
- [71] L. Sternberger and D. Bechmann. Deformable ray-casting interaction technique. In *In YoungVR February*, 2005.
- [72] R. Stoackley, M. J. Conway, and R. Pausch. Virtual reality on a wim : Interactive worlds in miniature. In *Proceedings of CHI : Human Factors in Computing Systems*, pages 265–272, 1995.
- [73] T. Stoffregen, L. Badry, B.G. Smart, and R. Pagulayan. On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments. In *L.J. Hettinger and M.W. Haas (Eds), Psychological issues in the design and use of virtual and adaptative environments*, pages 111–128, 2003.
- [74] D. J. Sturman, D. Zeltzer, and S. Pieper. Hands-on interaction with virtual environments. In *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 19–24, 1989.
- [75] V. Tanriverdi and R. J. K. Jacob. Interacting with eye movements in virtual environments. In *Proceedings of CHI'00*, pages 265–272, 2000.
- [76] J. Tisseau. *Réalité virtuelle : autonomie in virtuo*. PhD thesis, Université de Rennes I (France), 6 décembre 2001.
- [77] M. Usoh, K. Arthur, M. C. Whitton, R. Bastos, A. Steed, M. Slater, and J. F. P. Brooks. Walking > walking-in-place > flying. In *Virtual Environments*, 1999.
- [78] C. Ware and S. Osborne. Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments. In *Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 175–183, 1990.
- [79] C. Ware and S. Osborne. Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments. In *Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 175–183, 2000.
- [80] G. Wesche and M. Droske. Conceptual free-form styling on the responsive workbench. In *Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 83–91, 2000.
- [81] M. Wloka and E. Greenfield. The virtual tricorder : A uniform interface for virtual reality. In *Proceedings of the 1995 ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '95)*, ACM Press, pages 39–40, 1995.
- [82] L. Yan, R. Allison, and S. Rushton. New simple virtual walking method-walking on the spot. In *Symposium on Immersive Projection Technology*, 2004.
- [83] D. Zeltzer. Autonomy, interaction, and presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1) :127–132, 1992.
- [84] S. Zhai. *Human Performance in Six Degree of Freedom Input Control*. PhD thesis, Dept. of Computer Science, University of Toronto, 1995.
- [85] S. Zhai, W. Buxton, and P. Milgram. The "silk cursor" : Investigating transparency for 3d target acquisition. In *Proceedings of ACM CHI'94 Conference on Human Factors in Computing Systems*, volume 1, pages 459–464, 1994.