

Contrôle d'application en environnement virtuel : le Command and Control Cube

Jérôme Grosjean & Sabine Coquillart.

i3D, INRIA, Domaine de Voluceau, 78153 Le Chesnay Cedex, France

[Jerome.Grosjean|Sabine.Coquillart]@inria.fr

Résumé : *Les environnements virtuels permettent le développement de puissants outils d'interaction avec des mondes 3D générés par ordinateur. Des configurations comme le Plan de Travail Virtuel (Workbench), sont tout particulièrement adaptées à la manipulation interactive de scènes virtuelles. Un des points forts de ces configurations est la possibilité d'interagir directement et naturellement avec les modèles, l'espace de manipulation et de visualisation étant identiques. Les programmes développés pour ces environnements virtuels nécessitent des interfaces nouvelles, adaptées à leur nature spécifique. Si les premières applications ont principalement réutilisé le concept des menus 2D (métaphore du bureau, fenêtres et menus déroulants), directement portés dans l'espace à trois dimensions, ces solutions ne sont pas optimales. En effet, l'ajout d'une troisième dimension introduit entre autre des contraintes de sélection supplémentaires. Dans ce papier nous proposons un paradigme purement 3D pour le contrôle d'application en environnement virtuel : le "Command and Control Cube" (C^3). Inspiré des "Marking Menus" (menus circulaires "pop-up"), le C^3 étend le concept aux trois dimensions de l'espace en exploitant chaque dimension pour la sélection elle-même. Le C^3 est un menu évolutif, qui s'adapte au niveau d'expérience de l'utilisateur. Il procure un continuum entre un mode débutant avec retour visuel et un mode expert très rapide d'accès, qui peut être utilisé de façon similaire aux "raccourcis claviers". Des tests ont été menés pour évaluer le C^3 dans ses différents modes de fonctionnement. Une version hiérarchique a également été développée pour étendre son usage à un arbre d'options de menus, de taille quelconque.*

Mots-clés : retour d'efforts, architecture logicielle, réalité virtuelle.

1 Introduction

Les configurations d'environnement virtuel (EV) changent notre façon d'interagir avec des objets 3D, de naviguer dans des univers 3D et de contrôler les applications. Certaines de ces configurations comme les casques immersifs, la CAVETM [7], ou le Plan de Travail Virtuel ou "Workbench" [14, 15, 11] pour n'en citer que quelques-unes sont très prometteuses pour exploiter les potentialités offertes par les mondes 3D générés par ordinateur. Parmi ces configurations, le Plan de Travail Virtuel¹ est une des plus attractives pour la manipulation directe. Elle propose une zone de travail où les objets 3D peuvent être directement manipulés. Bien que cette configuration soit considérée comme immersive (ou semi-immersive), elle permet aussi aux utilisateurs de ne pas perdre le contact avec le monde réel, leur propre corps ou leurs collaborateurs, ce qui est souvent un des facteurs désorientant des EV.

De nombreuses applications opérationnelles sur stations de travail, comme des modeleurs ou des logiciels de visualisation de données scientifiques, peuvent grandement profiter de cette configuration. Le système de visualisation stéréoscopique, l'enregistrement des mouvements de la tête et l'interaction directe avec la scène virtuelle permettent de simplifier et de rendre plus naturelles des opérations comme déplacer des plans de coupe, sélectionner et manipuler des objets, modéliser en direct, déformer des objets 3D ou encore déplacer des sources de lumière.

Cependant, porter ces applications sur le plan de travail virtuel soulève un problème principal : reformuler pour un environnement 3D les techniques classiques d'interaction pour la manipulation et le contrôle d'application (e.g. changement de mode, envoi de commandes). Cette configuration diffère d'une station de travail sur plusieurs points majeurs. Le système de visualisation du plan de travail virtuel est un affichage stéréoscopique 3D qui permet aux utilisateurs de voir, de tourner autour et de manipuler des objets 3D vus en relief. L'enregistrement des mouvements de la tête permet une superposition de l'espace virtuel et de l'espace physique. En comparaison, sur station de travail, comme avec de nombreuses autres configurations, l'espace de visualisation reste distinct de l'espace de manipulation. Les périphériques d'entrée sont très différents également. Sur station de travail, les utilisateurs communiquent avec les applications à travers des périphériques d'interaction multi-usages : le clavier et la souris. Le nombre de signaux d'entrée est très élevé (102 touches sur un clavier de PC). Les périphériques

¹Le terme "Plan de Travail Virtuel" est employé ici pour décrire toutes les configurations du type "Workbench" à un ou deux écrans.

d'interaction génériques sur plan de travail virtuel sont souvent conçus pour la manipulation spatiale uniquement (léger et équipable) et ne disposent que de très peu de boutons, e.g. un ou deux seulement pour un stylo repéré dans l'espace.

Une interface de contrôle d'application, basée sur le clavier et la souris, est devenue très populaire sur les stations de travail : l'interface WIMP (Windows, Icons, Menus and Pointing). Ce choix d'interface homme-machine est universellement reconnu aujourd'hui comme un standard de facto pour ces configurations. Pour fournir un système d'accès rapide et léger aux commandes les plus usitées, un système de raccourcis claviers s'est également popularisé. Le clavier est en effet un outil efficace pour déclencher des commandes en une simple combinaison de touches (comme CTRL-S pour sauver un travail) et reste le moyen le plus rapide d'appeler des fonctions sur station de travail.

Dans les environnements virtuels le contrôle d'application est un domaine jeune et il n'existe pas encore de standard confirmé. Dans ce papier nous nous intéressons dans une première partie à la mise en place d'un nouveau système de contrôle d'application appelé "Command & Control Cube" (CCC ou C^3) pour un plan de travail virtuel (cf. Figure 1). Un des objectifs principaux dans le développement de ce nouveau paradigme de contrôle d'application, est de fournir aux utilisateurs un premier système, simple et rapide, pour déclencher un jeu réduit de commandes au sein de l'application. L'idée consiste à mettre en place pour les environnements virtuels, et notamment la configuration appelée plan de travail virtuel, une sorte d'équivalent des raccourcis clavier existant sur les stations de travail.



FIG. 1 – Le C^3 sur le Plan de Travail Virtuel

La première partie de cet article propose une description des travaux antérieurs relatifs aux résultats présentés dans ce papier. La partie suivante décrit le C^3 . La troisième partie expose une expérience conduite pour évaluer les performances d'utilisateurs novices avec le C^3 dans ses différents modes de fonctionnement et analyse l'apport de retours d'informations supplémentaires, sous forme sonore et tactile, pour sa manipulation. La dernière partie étend le concept premier du C^3 , celui d'un menu rapide d'accès pour un jeu limité de commandes, à une version hiérarchique pouvant contenir un nombre quelconque d'options.

2 Travaux antérieurs

Le contrôle d'application dans les environnements virtuels est un domaine de recherche jeune. Les premières applications pour ces environnements ont immédiatement été confrontées au besoin de développer des interfaces spécifiques pour déclencher des fonctions ou contrôler l'état des variables dans les mondes 3D. Les premières solutions apportées ont suivi une approche pragmatique répondant au cas par cas à des besoins particuliers. A la conférence SIGGRAPH'2001 lors d'un cours sur la conception des interfaces 3D[1], Ernst Kruijff a proposé une classification pour les techniques de contrôle d'application actuelle, influencée par la description de techniques non conventionnelles de MacMillan et al.[23]. Il a notamment divisé les différentes approches en menus graphiques, commandes vocales, interaction gestuelle et outils. Dans la suite, nous exposons une classification différente, s'attachant plus spécifiquement aux menus à interface graphique.

Une première approche naturelle pour les concepteurs d'interface graphique 3D a consisté à porter les interfaces

2D vers le monde 3D. Dans le monde 2D (écran, clavier et souris) l'interface WIMP est maintenant le choix communément accepté pour contrôler les applications. Puisque cette interface est populaire et assez efficace en 2D, porter cette interface a l'avantage de proposer aux utilisateurs un système de contrôle d'application familier donc intuitif.

Deux catégories peuvent être distinguées dans cette approche, selon que les paradigmes 2D ont été directement implantés dans le monde 3D, ou que le concept 2D a été adapté ou étendu au monde 3D.

Enfin, certains concepteurs cherchent à inventer de nouveaux paradigmes d'interaction, fondamentalement et entièrement pensé pour l'interaction 3D en environnements virtuels. Cette troisième voie ne s'inspire pas des paradigmes 2D mais tente au contraire de proposer directement des techniques de contrôle d'application 3D.

2.1 Menus 2D implantés dans le monde 3D

Dans le monde 2D (écran, clavier et souris) l'interface WIMP est maintenant le choix communément accepté pour contrôler les applications. Porter cette interface a l'avantage de proposer aux utilisateurs une interface familière, rassurante et donc intuitive.

Cependant, la sélection d'options de menu dans un environnement 3D est assez différente de la sélection en 2D. Sélectionner un objet parmi un ensemble de fonctions est conceptuellement un choix à une seule dimension. L'ajout de dimensions supplémentaires est inutile et nuit à la simplicité de la tâche. Se déplacer dans un plan pour faire un choix 1D est relativement aisé avec une souris, malgré la seconde dimension. L'ajout de la charge de gestion de la profondeur rend cette tâche beaucoup moins facile et ralentit notablement le processus de sélection.

L'intégration des menus 2D se réalise en implantant les fenêtres ou menus 2D sous forme de plan dans le monde 3D. Leur placement à l'intérieur de l'univers virtuel est différent selon les techniques. Feiner et al. [10] est à ce sujet une source principale d'information sur le placement. Les menus peuvent être placés librement dans le monde virtuel (référence : monde), connectés à un objet virtuel (référence : objet), liés à une partie du corps de l'utilisateur comme la tête ou la main (référence : corps), ou placés en référence à un objet physique comme les bords du plan de travail virtuel (référence : équipement).

Les premiers menus 2D implantés dans le monde 3D se sont contentés de proposer des fenêtres flottant dans l'espace en face de l'utilisateur. La sélection directe d'objets par un outil de pointage non contraint dans l'espace 3D n'est pas optimale [18]. L'utilisation d'un rayon virtuel contrôlé par la main comme outil de pointage peut atténuer cette difficulté [24] en éliminant la contrainte de sélection en profondeur. Cependant la manipulation reste lente, car l'interaction n'est plus directe [21].

Une autre approche basée sur un équipement appelé "virtual tricorder" [26] suggère d'utiliser des menus 2D "ancrés". Le menu 2D est affiché comme un plan, à la position courante de l'équipement tenu dans la main. Le déplacement et la sélection à l'intérieur du menu sont effectués en pressant les boutons de la souris. Une technique de placement similaire propose de matérialiser le plan de sélection en tenant une palette [6, 18] physique transparente et plate dans la main non dominante et de sélectionner les options avec la main dominante. Le menu graphique est affiché directement sur la vitre transparente (à l'aide d'un capteur sur la palette), tirant avantage d'une manipulation basée sur un outil physique offrant un retour d'effort passif et un affichage virtuel. En contrepartie, cette méthode contraint l'utilisateur à garder en permanence un équipement plus ou moins encombrant dans sa main, ou à portée de main, pour pouvoir accéder au menu.

Le placement des menus 2D par rapport à des parties du corps est une dernière approche intéressante, faisant appel au sens proprioceptif [19, 4]. La proprioception² procure des avantages importants pour la manipulation directe (contrôle excellent de sa propre main), des indices mnémoniques physiques (retrouver des objets centrés sur son corps) et pour les actions gestuelles (rappel des actions).

2.2 Menus 2D adaptés ou étendus au monde 3D

Les paradigmes du monde 2D peuvent également s'intégrer dans les mondes 3D en s'adaptant à ses contraintes et en évoluant pour offrir une manipulation plus confortable, ou une apparence plus adéquate.

²La proprioception est "le sens d'une personne de la position et l'orientation de son corps et de ses membres"

Des menus 2D linéaires ont été portés en 3D sous la forme de menus circulaires ou les options sont disposés sur une bande. Le paradigme de sélection reste à une dimension tout en proposant une apparence 3D et une manipulation basée sur la rotation de la main [17, 25].

Deering a également proposé en 1995 une adaptation 3D et hiérarchique des "pie-menus" [8], des menus radiaux qui apparaissent sur invocation autour de la position courante d'un pointeur. Il utilise la profondeur comme dimension utile pour gérer l'affichage de la hiérarchie des menus.

Le menu C^3 fonctionne notamment comme un menu graphique actionné par la main, adapté du concept 2D des "Marking Menus" [16] pour s'étendre aux trois dimensions de l'espace et en tirer partie.

2.3 Nouveaux paradigmes

Enfin, certains chercheurs se sont penchés sur le développement de nouvelles techniques d'interaction, n'ayant aucun équivalent 2D. En 2001 Bowman et al. [2] ont présenté un nouveau menu appelé TULIP, basé sur le pincement des doigts de la main. Des "Pinch Gloves"TM sont utilisés comme gants pour détecter le pincement des doigts, tandis qu'un casque virtuel permet d'afficher des options de menus comme des étiquettes rectangulaires virtuelles prolongeant les doigts.

2.4 Evaluations

Il y a encore peu de travaux d'évaluation rigoureux portant sur les techniques de contrôle d'application en environnement virtuel. La plupart des études ne fournissent pas de tests formels au-delà des simples premières impressions des utilisateurs. Quelques chercheurs tentent de donner un cadre formel aux évaluations de ces techniques, en tenant compte de la multiplicité des facteurs (types d'utilisateur, équipement d'entrée/sortie, techniques d'interaction, type d'application, contexte de la tâche, etc.). Poupyrev et al. [22] ont proposé un cadre général pour les techniques de manipulation en environnement virtuel. Ils se sont concentrés sur des tâches de manipulations élémentaires, comme la sélection et le positionnement. Cet ensemble de tâches élémentaires est choisi de manière à couvrir la majorité des scénarios de manipulation, afin de pouvoir en tirer des résultats généraux et utiles pour les techniques de manipulation immersive. Bowman et al. ont présenté en 1999 un cadre d'évaluation semblable, basé sur une taxonomie de tâches élémentaires et l'étude de mesures de performances [3]. Le processus d'évaluation du C^3 est construit sur une tâche de sélection simple exposée dans cet article.

3 Description

Le C^3 [13] est construit comme une extension du concept de "Marking Menus" [16] à un univers à trois dimensions. Dans les "Marking Menus", la zone de sélection du menu, c'est à dire l'espace autour du pointeur de la souris est divisé en cadrans identiques, délimitant les différentes portions d'un disque. Pour étendre ce concept en trois dimensions, il faut décider du nombre d'options de menu souhaitées et diviser l'espace 3D en portions homogènes. Selon le nombre considéré, par exemple une dizaine, la division de l'espace environnant en unités élémentaires identiques peut être perturbante et difficile à concevoir. Aussi, une division plus simple a été retenue.

Une première approche consiste à décomposer l'espace autour du pointeur en un ensemble de directions simples (haut, bas, gauche, droite, avant, arrière). Les options sont alors disposées de manière intuitive dans l'espace, et facilement atteignables. Cependant, le nombre d'options disponibles est alors limité à un chiffre maximum de 6. Cela reste assez faible, même pour un système de raccourcis.

Une seconde approche a donc été envisagée, s'appuyant sur cette première idée pour organiser la division de l'espace en un schéma simple à appréhender et retenir, une forme cubique.

L'espace autour du pointeur est vu comme un cube dont il est le centre. Ce grand cube est divisé selon chacune de ses dimensions en trois petits cubes pour un total de $3 \times 3 \times 3 = 27$ petits cubes ou *cases*. Le pointeur débute dans le petit cube central de cette structure.

Pour actionner le pointeur, le C^3 propose un périphérique faisant office de souris 3D. Un simple bouton dont la position spatiale est capturée par un capteur électromagnétique est requis pour la manipulation. Le système de

”Pinch Glove” développé par Fakespace [9] ou la ”Ringmouse” [20] sont deux équipements valables. Pour des raisons pratiques, nous n’avons pas utilisé de système commercial mais en avons construit un à partir d’une souris standard et d’un capteur (cf. Figure 2). Les boutons de la souris servent de ”boutons à pincer” et sont placés au sommet de trois doigts de la main à l’aide de bagues en tissu. Ils peuvent être pressés avec le pouce. Le capteur est placé sur le poignet de l’utilisateur. Un seul des trois boutons est effectivement utilisé pour les besoins du C^3 .

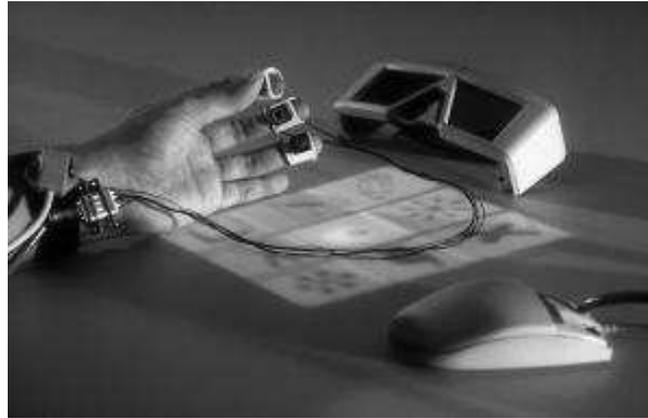


FIG. 2 – Les boutons et le capteur

En position de repos, le menu C^3 est invisible et ne gêne pas la vue. Lorsque l’utilisateur presse son pouce contre son index, il pince le bouton et déclenche l’apparition du C^3 , c’est à dire la forme cubique, à une distance fixe en avant de sa main, le capteur servant à calculer cette position. Afficher le menu relativement à la main permet de laisser à l’utilisateur le choix du meilleur endroit où faire apparaître le menu. Le C^3 reste à cette position fixe tant que le bouton est maintenu enfoncé.

Un pointeur prenant la forme d’une sphère jaune apparaît également au centre du C^3 , dans la case centrale. Tant que l’utilisateur maintient le bouton enfoncé, les mouvements du pointeur reproduisent fidèlement les mouvements de la main avec une correspondance un pour un. Cependant, la sphère ne peut pas quitter le volume cubique du C^3 , aussi l’utilisateur peut-il librement effectuer des mouvements larges, la sphère reste contrainte dans le cube.

En déplaçant sa main, l’utilisateur peut placer le pointeur sphérique dans n’importe laquelle des 27 cases du menu C^3 . A chaque case est associée une fonction de l’application et une icône placée sur le sommet de chaque petit cube sous forme d’une texture. La visibilité de ces textures est assurée par le fait que le C^3 apparaît à hauteur de la main, donc sous le regard de l’utilisateur en général. Cependant, les étages supérieurs de cases cachent les étages inférieurs à la vue. En conséquence un seul étage de cases est affiché à un instant donné, celui correspondant à la position courante du pointeur sphérique, et ce à tout instant. Pour différencier en un seul coup d’oeil l’étage courant à l’intérieur de la structure cubique, l’enveloppe transparente du cube englobant est également affichée (cf. Figure 3).

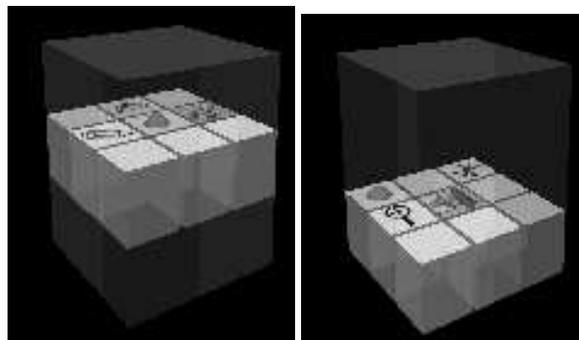


FIG. 3 – Deux positions du C^3

Les 27 cases sont configurables pour accueillir n’importe quelle icône et fonction de l’application, à l’exception de la case centrale, qui est réservée comme case d’annulation pour sortir du menu sans invoquer de commande.

Ainsi, si l'utilisateur presse par inadvertance le bouton, il déclenchera l'option correspondant à la case où débute le pointeur sphérique, la case centrale, et ne déclenchera pas une commande quelconque.

La sélection d'une fonction à l'intérieur du menu est donc réalisée par la simple séquence suivante : pincer les doigts pour faire apparaître le C^3 en face de sa main, maintenir le bouton et bouger la main dans une direction pour placer la sphère dans la case voulue, relâcher le bouton une fois dans cette case pour activer la fonction associée.

La sélection avec le C^3 s'effectue avec la main non-dominante. Cette décision a été prise pour libérer la main dominante, qui est souvent concentrée sur la tâche principale et/ou tient déjà un outil. La main non dominante permet de changer de mode, activer des options, changer l'outil de la main dominante, etc. sans stopper le fil des actions de la main dominante, qui est prioritaire.

Le C^3 propose deux modes de fonctionnement, un mode novice et un mode expert, basés sur la même technique de sélection. Dans les "Marking Menus", un délai est utilisé pour retarder l'affichage du menu circulaire et permettre à un utilisateur expérimenté de réaliser des sélections "en aveugle", sans être perturbé par l'affichage bref du menu. Un utilisateur novice laisse naturellement s'écouler ce délai (de l'ordre du tiers de seconde) et effectue ses sélections en utilisant le retour visuel. Un utilisateur chevronné connaît par coeur la disposition des options dans le menu et peut choisir la direction de son mouvement, avant de voir le menu s'afficher.

Cette méthode a été appliquée dans un premier temps au menu C^3 mais des tests informels avec plusieurs valeurs de délai n'ont pas donné un confort suffisant à la manipulation. Trop court, le délai n'est pas suffisant pour couvrir le temps nécessaire au mouvement de la main ; trop long, le délai devient une gêne pour l'utilisateur novice. Une seconde approche a donc été choisie, où le C^3 s'adapte aux besoins de l'utilisateur.

En utilisant les données venant du capteur positionné sur la tête en plus de celles de la main, il est possible de déterminer la direction de regard de l'utilisateur et de vérifier si elle entre dans un cône de sommet la tête et d'axe tête- C^3 (cf. Figure 4). Ainsi, lorsque l'utilisateur est concentré sur une tâche en cours et ne se préoccupe pas du menu, celui-ci n'apparaît pas, et lorsqu'il hésite ou décide qu'il a besoin d'une confirmation visuelle, il déplace son regard spontanément et tout naturellement vers l'endroit où celui-ci apparaît.

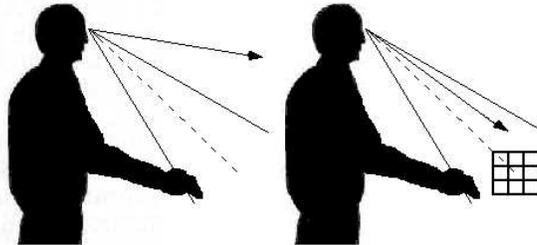


FIG. 4 – Cône de visibilité du C^3

La sélection en aveugle est possible car elle exploite plusieurs indices de positionnement. D'abord elle s'appuie sur la mémorisation d'une direction plutôt que celle d'une distance selon une direction donnée (comme dans les menus déroulants), ce qui a été prouvé plus efficace [5]. Ensuite elle s'appuie sur une organisation simple de l'espace en cases formant une structure cubique autour d'une position de départ. Cette représentation mentale aide l'utilisateur à visualiser le mouvement à réaliser. La réalisation de la sélection elle-même est alors facilitée d'une part par l'alignement des axes du cube avec des directions simples relativement au corps de l'utilisateur (haut, bas, droite, gauche, avant, arrière) lui permettant de bénéficier du sens proprioceptif, d'autre part par l'alignement de ces axes avec ceux de la configuration elle-même, les bords du plan de travail virtuel, ajoutant un indice visuel sous-jacent.

4 Évaluations expérimentales et analyses

L'approche proposée par le C^3 est évaluée [12] ici sur une tâche simple de sélections répétitives d'options à l'intérieur du menu. Du fait de la spécificité spatiale du procédé de sélection du C^3 , nous nous intéressons notamment à l'effet de la position des options à l'intérieur du cube sur les performances (vitesse et précision). De plus, nous voulons évaluer les effets des quatre conditions suivantes sur l'interaction. Deux des quatre conditions sont les modes standards de fonctionnement du C^3 , i.e. le mode d'apprentissage (avec retour visuel), et le mode expert (sans retour visuel, c'est à dire une manipulation "en aveugle"). Deux conditions additionnelles sont construites

en associant au mode expert des retours sur des canaux sensoriels différents : mode expert augmenté d'un signal sonore (sans retour visuel, avec retour sonore), mode expert augmenté d'un signal tactile (sans retour visuel, avec retour tactile). Ces conditions supplémentaires sont ajoutées dans l'espoir d'améliorer la sélection "en aveugle".

Dans le mode expert augmenté d'un signal sonore, un court bip sonore est émis chaque fois que le pointeur croise la frontière entre deux cases. Le mode expert augmenté d'un signal tactile fonctionne de la même manière en émettant une courte vibration sur le pouce et l'index de l'utilisateur au passage d'une frontière. Un gant "CyberTouch"TM (un gant équipé de vibreurs sur la dernière phalange de chaque doigt et dans la paume) est utilisé pour produire les vibrations. Puisque nous voulons tester le C^3 dans son mode de fonctionnement standard, i.e. sélections par la main non-dominante, le "CyberTouch" utilisé est un gant gauche pour des utilisateurs droitiers.

4.1 Les sujets

La population d'utilisateurs consiste en 23 sujets (18 hommes et 5 femmes). Seulement quatre d'entre eux sont déjà familiers du plan de travail virtuel. Aucun n'a d'expérience préalable avec le menu C^3 . Les sujets sont tous droitiers.

4.2 La tâche

La tâche consiste à sélectionner séquentiellement chacune des 26 cases du C^3 dans un ordre de passage aléatoire.

La principale difficulté est de décider de quelle manière informer les utilisateurs de la case à sélectionner, sans leur demander au préalable d'apprendre par coeur un jeu de fonctions et leurs positions dans le cube. L'objectif est de séparer le travail cognitif consistant à reconnaître la case demandée de l'aspect manipulation qui est étudié ici. Il est donc impossible d'utiliser le nom d'une fonction pour désigner une case.

Chaque case étant une combinaison simple de directions spatiales (haut, bas, avant, arrière, gauche, droite) il pourrait être envisagé de décrire oralement la case à sélectionner. Cependant cette solution est rejetée car elle peut favoriser une stratégie de déplacement du pointeur dans le C^3 (mouvement décomposé selon les trois axes) aux dépens des autres possibles (notamment réaliser des mouvements diagonaux).

Pour ne pas influencer le sujet, il est finalement décidé de lui présenter une représentation complète du menu C^3 et de ses 27 cases, et d'illuminer la case à sélectionner. Les sujets savent ainsi immédiatement quelle case ils doivent sélectionner, sans qu'aucune présomption de mouvement ne soit induite. Cette représentation est un objet graphique supplémentaire dans la scène et n'est pas le menu C^3 lui-même, qui reste positionné, lorsqu'il est invoqué, devant la main de l'utilisateur.

Les quatre modes sont testés dans un ordre différent pour chacun des 23 sujets de l'expérience. Pour chacune des conditions expérimentales l'utilisateur porte un gant "CyberTouch", le dispositif nécessaire au C^3 (bouton sur le doigt et capteur), et les lunettes stéréoscopiques. Les 27 cases sont affichées devant les yeux de l'utilisateur. La case courante s'illumine jusqu'à ce qu'une sélection soit réalisée. Le système informe alors l'utilisateur du résultat obtenu en illuminant en vert la case si elle a été correctement atteinte, ou en illuminant en rouge la case sélectionnée par erreur. Après un délai de deux secondes, la sélection d'une nouvelle case est proposée et le test continue de la même manière.

Toutes les cases sont testées deux fois en tout, à l'exception de la case centrale qui est réservée à l'action d'annulation et n'est pas testée ici.

4.3 Données collectées

Les données enregistrées sont le flot des coordonnées des différents capteurs, la liste ordonnée des cases demandées et les sélections effectivement réalisées par l'utilisateur, et enfin les trois temps de sélection (lorsque la case s'illumine, lorsque l'utilisateur invoque le menu en pressant le bouton pour la première fois, lorsque l'utilisateur termine sa sélection en relâchant le bouton). La vitesse de sélection se déduit directement de ces données.

5 Résultats et discussion

Une analyse de la variance (ANOVA) avec mesure répétée a été réalisée sur les variables précision et vitesse pour les quatre conditions : sans retour (mode aveugle), avec retour visuel, avec retour sonore, avec retour tactile.

La vitesse est significativement affectée par la condition ($F(3,66) = 4.42, p < 0.0068$). Des tests supplémentaires (HSD Tukey) indiquent que les utilisateurs réalisent rapidement la sélection dans la condition visuelle ($m = 1,0s$) comparativement aux autres conditions (aveugle : $m = 1,2s$; son : $m = 1,3s$; tactile : $m = 1,3s$). Cette supériorité du mode visuel peut s'expliquer par le fait que les utilisateurs sont tous novices. Ils ont encore besoin du support visuel pour être confiant dans leurs sélections et pour les réussir rapidement.

La précision est aussi significativement affecté par la condition ($F(3,66) = 10,616, p < 0.0001$). Le pourcentage moyen de cases correctement sélectionnées est de 92.8% avec retour visuel, 87.0% dans le mode aveugle, 83.5% avec retour sonore et 84.7% avec retour tactile. Un des points d'intérêt de cette étude était de vérifier que les sélections en absence de tout retour sensoriel avec la main non-dominante étaient possibles. Considérant que les utilisateurs découvraient le menu pour la première fois, et pour certains la configuration elle-même, les résultats semblent favorables à cette hypothèse. Les résultats du mode visuel, bien que proche de 100% ne sont pas parfaits. Une explication peut être trouvée dans la contrainte de vitesse qui était demandée aux sujets du test.

Les performances plus faibles des conditions tactiles et sonores peuvent s'expliquer par la nature parfois perturbante de ces signaux. Les sujets ont remarqué qu'ils n'arrivaient pas toujours, pour les mouvement diagonaux à distinguer entre un seul bip (ou vibration) et deux ou trois bips (ou vibrations) successifs. Les sujets qui emploient une stratégie de décomposition de leurs mouvements selon les trois axes n'ont pas rencontré ce problème. Dans la plupart des cas, les sujets utilisent les canaux sensoriels sonores et tactiles pour vérifier la validité de leur mouvement, plus que pour réaliser le mouvement lui-même.

La hauteur d'une case dans le C^3 (position) a aussi un effet significatif ($F(2,44) = 134,058, p < 0.0001$). Chaque valeur de précision représente un nombre de sélections correctes réalisées dans un plan (avec un maximum de 18 donc). Le nombre de sélections correctes est plus élevé dans le plan central ($m = 17,352$), puis dans le plan supérieur ($m = 15,587$) et enfin dans le plan inférieur ($m = 12,859$). Les mouvements à hauteur de la main sont les plus aisés. Une explication possible est le moindre effort du bras requis par les mouvements dans le plan central par rapport aux mouvements qui changent de niveau. Il faut noter également que la présence de l'écran horizontal du plan de travail virtuel sous la main de l'utilisateur a pu gêner ou retenir les utilisateurs dans leurs intentions de mouvement vers le bas.

L'interaction double du mode et de la position est également significative ($F(6,132) = 2,684, p < 0.0172$). Cette interaction peut être interprétée dans le tableau suivant : Figure 5.

	lower plane						middle plane						upper plane													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
blind	32	39	35	36	29	35	40	34	45	46	46	45	45	43	44	45	46	44	40	43	39	29	39	41	40	40
visual	36	42	43	42	37	41	43	43	42	44	46	45	46	46	44	46	44	42	43	43	39	43	42	44	42	42
sound	29	34	32	29	33	33	41	38	37	44	44	44	41	44	42	41	40	41	41	42	39	36	37	40	42	35
tactil	29	36	37	32	26	33	37	38	41	45	46	46	46	45	42	42	46	43	38	40	41	29	40	37	40	38

FIG. 5 – Position des cellules et précision (cellules gris sombre : 100% correct ; cellules grises : score au-dessus du dernier quartile ; cellules blanches : score en dessous du premier quartile ; cellules gris clair : autres scores)

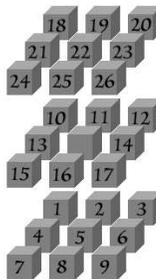


FIG. 6 – Numérotation des cases

Chaque ligne du tableau présente une condition différente, alors que les colonnes sont les cases des trois plans horizontaux, du plus bas au plus haut (cf. Figure 6 pour la numérotation des cases). Les cellules contiennent la somme de toutes les réponses correctes pour les 23 utilisateurs pour une case. La valeur de la médiane est de 41 bonnes réponses. Les cellules avec des résultats en dessous du premier quartile sont sur fond blanc. Celles avec des résultats au-dessus du dernier quartile sont sur fond gris, et celles avec un taux de 100% sont sur fond gris sombre.

La distribution de teinte grise montre quelques tendances générales. Les performances les plus faibles sont obtenues pour des cases dans le plan inférieur. Ce résultat s'explique par la proximité de l'écran du plan de travail virtuel. Dans ce plan, les mouvements qui demandent à l'utilisateur d'allonger son bras reçoivent de moins bons résultats, tandis que ceux moins éloignés du corps obtiennent de meilleurs scores. Les meilleurs résultats sont obtenus dans le plan du milieu, avec des performances légèrement moins bonnes quand la main est trop proche du corps et légèrement meilleures quand elle s'en éloigne pour une distance plus confortable. Il semble d'une manière générale que les utilisateurs réussissent mieux les mouvements demandant un minimum de flexion de leur bras.

6 Version hiérarchique

Disposant d'une solution fonctionnelle pour contrôler un petit jeu de commandes, l'étape suivante consiste à étendre cette solution à une version hiérarchique, sous forme d'arbre de menus et de sous-menus, afin de gérer un nombre arbitrairement grand d'options. Plusieurs approches sont envisageables.

Dans le fonctionnement hiérarchique classique des menus déroulants, la sélection est réalisée par un mouvement continu. Le pointeur suit un parcours allant de menus en sous-menus, franchissant des frontières bien définies entre les menus. Il n'y a pas de zones de transition et les menus ne se chevauchent pas. Le point de sortie du menu père est juxtaposé à l'option choisie, et le point d'entrée dans le menu fils est toujours situé en haut du menu. Il n'y a pas de symétrie. Le segment à traverser pour descendre dans le sous-menu est également souvent très étroit (de la hauteur du texte désignant l'option). Tous ces points concourent à freiner et rendre contraignante la descente et la remontée dans le système hiérarchique.

Un tel système n'est pas forcément souhaitable pour le plan de travail virtuel et le C^3 . Notamment, l'idée de réaliser la sélection d'un seul mouvement continu, qui sera ici plus large dans l'espace que le mouvement de la main sur la souris, comporte le risque de faire entrer la main de l'utilisateur en collision avec l'écran horizontal du plan de travail virtuel. Cette situation peut se produire dans le cas d'une succession de sélections de sous-menus positionnés les uns en dessous des autres. D'une manière générale, l'amplitude du mouvement de sélection peut vite prendre des dimensions importantes dans le cas de nombreux sous-menus successifs.

Notre solution s'est donc portée sur l'idée de restreindre la manipulation du C^3 hiérarchique à une zone délimitée de l'espace, qui soit confortable pour l'utilisateur : la position de départ du C^3 , qui correspond déjà à son choix préféré. Les menus et sous-menus s'affichent tous à cette position. La géométrie (forme, placement) du C^3 ne change donc pas, mais le contenu sémantique des cubes (fonctions associées et icônes) est adapté à la position du pointeur au sein de l'arbre des sous-menus.

Pour descendre dans un sous-menu associé à une case donnée, il faut sélectionner la case, c'est à dire relâcher le bouton une fois dedans, comme pour une sélection normale. S'il peut être contraignant d'avoir à cliquer pour entrer dans un sous-menu, c'est nécessaire pour distinguer l'entrée dans la case avec le pointeur, du choix de descendre dans le sous-menu. En distinguant ces deux opérations, il est possible de naviguer de cases en cases, sans que les sous-menus remplacent involontairement le contenu courant du C^3 et de n'entrer dans un sous-menu que lorsque l'utilisateur l'a réellement décidé. De plus, cela maintient une cohérence d'interaction vis à vis des cases du C^3 .

A l'issue de cette sélection un nouveau contenu du C^3 est affiché, le menu reste visible mais cette fois la main ne presse plus le bouton. La situation ne diffère de la position de repos avant une première invocation du menu que par la visibilité du C^3 en face de l'utilisateur. Dans ce cas de figure, le pointeur sphère est replacé au centre du C^3 , fixe et en attente. Tant que l'utilisateur ne réappuie pas sur le bouton, celle-ci ne bouge pas. Dès qu'il appuie, il la rend à nouveau solidaire des mouvements de sa main, comme s'il la saisissait, et la sélection suit toujours le même principe.

La case centrale, qui est une case d'annulation dans le premier menu rencontré, devient dans les sous-menus une case de "remontée" vers le menu père. Si l'action de remontée est choisie, le mécanisme est similaire à la descente dans un sous-menu. Le C^3 reste visible, son contenu change pour correspondre aux 26 options du menu père, et le

pointeur sphère se replace au centre du C^3 , en attente d'être saisi.

Pour ajouter un indice visuel supplémentaire permettant de se repérer dans la hiérarchie, chaque fois que l'utilisateur descend dans un sous-menu, la case choisie pour descendre est réaffichée dans une pile verticale au-dessus de la représentation visuelle courante du C^3 . Au fur et à mesure de la descente dans les sous-menus, la liste de toutes les cases empruntées pour arriver au cube courant apparaît donc en rappel au-dessus du C^3 (cf. Figure 7).

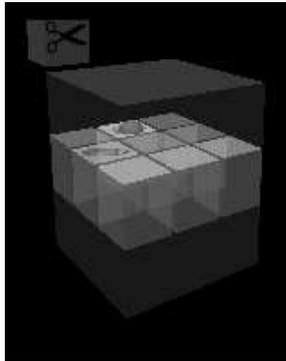


FIG. 7 – Le C^3 hiérarchique

Pour résumer, descendre dans la hiérarchie des sous-menus consiste à enchaîner des sélections simples, selon le même paradigme d'interaction que le C^3 non hiérarchique. Remonter dans la hiérarchie ou quitter le menu sans sélectionner est très simple également, même lorsque le pointeur est descendu profondément dans l'arbre des sous-menus. Il suffit de presser le bouton sans bouger la main. En effet, la sphère est toujours replacée en attente au centre des cubes après chaque action de montée ou de descente. Par conséquent cliquer sans bouger fait choisir la case centrale, i.e. remonter de noeuds en noeuds dans l'arbre jusqu'au noeud racine, puis sortir du menu.

7 Conclusion et travaux futurs

Le C^3 a été développé dans l'intention initiale de fournir un système de menu rapide d'accès sur un petit jeu de commandes usuelles, pour la configuration de réalité virtuelle appelée plan de travail virtuel. Ce système très similaire dans l'esprit aux raccourcis clavier des stations de travail, s'inspire du concept des "Marking Menus" et les étend à trois dimensions en profitant pleinement des trois dimensions de l'espace comme dimensions de sélection.

Le C^3 permet de libérer l'attention de l'utilisateur pour la tâche principale, par son utilisation en main non-dominante. Un souci tout particulier a été porté aux considérations de placement et d'occupation de l'espace. Le C^3 n'est présent à la vue que sur invocation et il est invocable n'importe où pour ne pas gêner la vue d'une scène. Les mouvements de sélection peuvent être rapides et libres. Ils sont larges dans leur tolérance en amplitude par l'utilisation de parois bloquantes pour le pointeur. L'utilisation de mouvements relatifs à une position de départ permet d'éviter tout problème de calibrage des capteurs.

Des évaluations ont été menées pour tester la viabilité d'une utilisation du C^3 en mode expert "aveugle" et par la main non-dominante. L'ajout de retours sensoriels supplémentaires, sonore et tactile, ne s'est pas révélé satisfaisant dans ce cadre. Les premiers résultats sur des utilisateurs novices sont encourageants et montre un taux de réussite élevé même dans des conditions "aveugle" à priori difficile. Des tests supplémentaires devront être menés pour étudier l'effet de l'apprentissage sur les utilisateurs.

Suite à ces résultats une version étendue du C^3 a été réalisée, pour obtenir un système de contrôle d'application complet par l'ajout du concept de hiérarchie. Le C^3 hiérarchique peut désormais gérer un arbre arbitrairement grand de menus et sous-menus. Des évaluations du C^3 hiérarchique peuvent faire l'objet de travaux futurs, notamment en le comparant aux autres solutions existantes sur ces configurations d'environnement virtuel.

Le C^3 est fonctionnel et actuellement utilisé dans plusieurs applications du plan de travail virtuel, dont par exemple une application de visualisation d'un habitacle de voiture avec une gamme simple d'outils d'exploration, une application de visualisation de modèles fractals ou encore une application de modélisation à partir d'objets mous.

Le C^3 a été développé pour le plan de travail virtuel mais pourrait être étendu simplement à d'autres configurations similaires de réalité virtuelle. Il serait ainsi intéressant d'étudier comment celui-ci s'intègre dans d'autres configurations comme la CAVE ou les casques, qui ne disposent pas d'un référentiel physique pour aligner les axes du cube.

Références

- [1] D. A. Bowman, J. LaViola, M. Mine, and I. Poupyrev. Advanced topics in 3d user interface design. In *Course Notes - SIGGRAPH 2001*, 2001.
- [2] D.A. Bowman and C.A. Wingrave. Design and evaluation of menu systems for immersive virtual environments. In *Proc. IEEE VR'2001*, 2001.
- [3] Doug Bowman, Donald Johnson, and Larry F. Hodges. Testhed evaluation of VE interaction techniques. In Mel Slater, editor, *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST-99)*, pages 26–33, N.Y., December 20–22 2000. ACM Press.
- [4] J. Butterworth, A. Davidson, S. Hench, and T. M. Olano. 3dm : A three dimensional modeler using a head-mounted display. In *Proc. 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 135–138, 1992.
- [5] Jack Callahan, Don Hopkins, Mark Weiser, and Ben Shneiderman. An empirical comparison of pie vs. linear menus. In *Proceedings of ACM CHI'88 Conference on Human Factors in Computing Systems*, Menus, pages 95–100, 1988.
- [6] S. Coquillart and G. Wesche. The virtual palette and the virtual remote control panel : A device and an interaction paradigm for projection-based virtual environments. In *IEEE VR'99*, 1999.
- [7] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, and Thomas A. DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality : The design and implementation of the CAVE. In James T. Kajiya, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings)*, volume 27, pages 135–142, August 1993.
- [8] Michael F. Deering. HoloSketch : a virtual reality sketching/animation tool. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2(3) :220–238, September 1995.
- [9] Fakespace. <http://www.fakespacelabs.com/>.
- [10] S. Feiner, B. Macintyre, and D. Seligmann. Knowledge-based augmented reality. *Communications of the ACM*, 36(7) :53–61, 1993.
- [11] B. Frölich, B. Kirsch, W. Krüger, and G. Wesche. Further development of responsive workbench. In M. Göbel, editor, *Virtual Environments '95*, Eurographics, pages 237–246. Springer-Verlag Wien New York, 1995.
- [12] J. Grosjean, J.-M. Burkhardt, S. Coquillart, and P.Richard. Evaluation of the command and control cube. In *ICMI'2002*, Pittsburgh, US, October 2002.
- [13] J. Grosjean and S. Coquillart. Command & control cube : a shortcut paradigm for virtual environments. In *IPT-EGVE'2001*, Stuttgart, Germany, May 2001.
- [14] W. Krüger and B. Fröhlich. The responsive workbench. *IEEE Computer Graphics and Applications*, pages 12–15, May 1994.
- [15] Wolfgang Kruger, Christian-A. Bohn, Bernd Frohlich, Heinrich Schuth, Wolfgang Strauss, and Gerold Wesche. The responsive workbench : A virtual work environment. *Computer*, 28(7) :42–48, July 1995.
- [16] Gordon Kurtenbach and William Buxton. User learning and performance with marking menus. In Beth Adelson, Susan Dumais, and Judith Olson, editors, *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 258–264, New York, NY, USA, April 1994. ACM Press.
- [17] Jiandong Liang and Mark Green. JDCAD : A highly interactive 3D modeling system. *Computers and Graphics*, 18(4) :499–506, July–August 1994.
- [18] R. Lindeman, J. Sibert, and J. Hahn. Hand-held windows : Towards effective 2d interaction in immersive virtual environments. In *IEEE VR'99*, 1999.
- [19] Mark R. Mine, Frederick P. Brooks, Jr., and Carlo H. Séquin. Moving objects in space : Exploiting proprioception in virtual-environment interaction. In Turner Whitted, editor, *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 19–26. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1997. ISBN 0-89791-896-7.

- [20] Ring Mouse. <http://www.worklink.net/ringmouse.html>.
- [21] A. Paljic, J.-M. Burkhardt, and S. Coquillart. A study of distance of manipulation on the responsive workbench. In *IPT'2002 Symposium, Orlando, US, 2002*.
- [22] I. Poupyrev, S. Weghorst, M. Billinghurst, and T. Ichikawa. A framework and testbed for studying manipulation techniques for immersive VR. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST-97)*, pages 21–28, New York, September 15–17 1997. ACM Press.
- [23] McMillan G. Egelston R. and Anderson T. Nonconventional controls. In *Handbook of human factors and ergonomics*, pages 729–771, 1997.
- [24] Ron van Teylingen, William Ribarsky, and Charles van der Mast. Virtual data visualizer. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 3(1) :65–74, January – March 1997. ISSN 1077-2626.
- [25] G. Wesche and M. Droske. Conceptual free-form styling on the responsive workbench. In *VRST 2000*, 2000.
- [26] Matthias M. Wloka and Eliot Greenfield. The virtual tricorder : A uniform interface for virtual reality. In *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Virtual and Augmented Realities*, pages 39–40, 1995. TechNote.