



www.ichim.org

Les institutions culturelles et le numérique
Cultural institutions and digital technology

École du Louvre
8 - 12 septembre 2003

**INTERACTION PHYSIQUE AVEC LE MONDE
VIRTUEL**

**Rodolphe Gelin, Jean-Pierre Martins, Service Robotique
et Systèmes Interactifs - CEA-LIST, France**

« Acte publié avec le soutien de la Mission de la Recherche et
de la Technologie du Ministère de la Culture et de la Communication »

Résumé

Si la représentation visuelle des objets sur un écran d'ordinateur nous est devenue familière avec les images de synthèse, leur représentation physique permettant de solliciter le sens du toucher n'en est qu'à ses débuts.

Grâce à des technologies issues de la simulation et de la téléopération, il est aujourd'hui possible d'entrer en contact physique avec des objets du monde virtuel n'existant que dans la mémoire des ordinateurs.

Dans cet article nous présenterons les derniers développements technologiques réalisés dans le domaine et leurs applications. Nous essaierons également de broser ce que peut en être leur avenir.

Mots-clés □ Réalité Virtuelle, Immersion, Retour Haptique

Abstract

We are all familiar with graphical representation of objects on the screen of a computer. On the other hand, the physical representation of the objects allowing their dynamic behaviour and the ability to touch and manipulate them is just beginning.

Thanks to technologies coming from simulation and teleoperation, it is now possible to get a physical contact with virtual objects. It is today possible to touch objects when they are still in the memory of the computer.

In this paper, we present the latest technological developments performed in CEA. We also present the industrial application of this technology. At the end, we try to imagine what will be the future of them.

Keywords □ Virtual Reality, Immersion, Haptic feedback

Introduction

Si la représentation visuelle des objets sur un écran d'ordinateur nous est devenue familière avec les images de synthèse, leur représentation physique permettant de solliciter le sens du toucher n'en est qu'à ses débuts.

Grâce à des technologies issues de la simulation et de la téléopération, il est aujourd'hui possible d'entrer en contact physique avec des objets du monde virtuel n'existant que dans la mémoire des ordinateurs.

Dans cet article nous présenterons les derniers développements technologiques réalisés dans le domaine et leurs applications. Nous essaierons également de brosser ce que peut en être leur avenir.

Présentation de la Réalité Virtuelle

Les images de synthèse

Apparue dans les années 1970, la notion de réalité virtuelle rassemble un certain nombre de technologies innovantes qui vont permettre d'une interaction plus naturelle aux utilisateurs de systèmes informatiques. Il s'agit de faire comprendre à l'utilisateur ce qui se passe dans la mémoire des ordinateurs. Du fait qu'un dessin en dit souvent plus qu'un long discours, c'est l'utilisation du graphique qui a été exploitée en premier. Voir un cercle s'afficher sur son écran est beaucoup plus parlant, pour le commun des mortels, que de lire l'équation $X_+Y_=1$ s'inscrire en lettres vertes sur fond noir.

D'abord en 2 dimensions puis en 3 dimensions, le graphique s'est imposé comme mode d'interaction entre l'homme et l'ordinateur depuis la représentation de données jusqu'à l'interface avec le système d'exploitation qui présente lui-même son arborescence de fichiers sous forme de «Dossiers□ posés sur un «Bureau□ qui sont tout ce qu'il y a de plus virtuels.

Très vite, les sorties graphiques des ordinateurs ont été appréciées du public. On ne comptait plus les publicités, les reportages voire les films qui usaient et abusaient des «Images de synthèse» pour donner une coloration scientifique à leur propos. Certains artistes y trouvèrent même un support à leur création puisqu'en 1982, Moebius s'impliqua dans la production du film TRON qui mettait en scène des personnages humains perdus dans la mémoire d'un ordinateur. Plus que les voir se battre contre des 0 et des 1, le réalisateur avait choisi de donner une apparence plus appréhensible par le spectateur comme la fameuse course de voiture. Le côté binaire de la mémoire informatique étant traduit par le fait que les voitures ne pouvaient tourner qu'à angle droit.

Les fabricants de matériel informatique ayant compris l'attrait du graphique sur le public ont mis l'accent sur l'amélioration des performances du matériel. Les calculateurs et les cartes graphiques ont progressé de façon extraordinaire. Il est maintenant possible d'afficher les mouvements de volumes 3D en gérant les parties cachées en habillant le tout de textures qui donnent à l'image de synthèse une apparence presque réelle. Les dernières limitations dues à la puissance de calcul, et non à la finesse des algorithmes, sont visibles en comparant le rendu des derniers films en image de synthèse, comme «Schreck», et les derniers jeux vidéos □ l'exigence de l'animation en temps réel dans ce dernier cas oblige encore les infographistes à donner à leurs personnages des apparences un peu anguleuses et des mouvements encore un peu raides. Pour le cinéma, il est possible de mettre une heure pour calculer toutes les images d'une séquence de 10 secondes, la finesse de la restitution peut être améliorée.

Simulation ou Réalité Virtuelle

C'est là sans doute que réside une des grandes différences entre cette science très ancienne qu'est la simulation avec ces technologies qui ont été relativement récemment rassemblées sous le nom de réalité virtuelle.

Nous le rappellerons souvent, la simulation, telle que l'entend l'ingénieur, doit offrir une représentation numérique exacte d'un phénomène physique. En revanche, tout est permis pour atteindre cette exactitude □ les calculateurs les plus puissants et les temps de calcul

les plus famélicux. La simulation d'un crash d'une voiture dans un mur pour étudier le déploiement d'un air bag peut prendre une nuit de calcul même si le phénomène physique ne dure en tout et pour tout que quelques dixièmes de seconde. Pour interagir de façon réaliste avec son environnement, l'opérateur d'un système de réalité virtuelle doit voir se dérouler en quelques secondes un événement qui dure quelques secondes. Il n'y a que dans Matrix que le spectateur supporte, voire demande, que les actions les plus rapides se déroulent au ralenti pour qu'il ait le temps de profiter de toute la chorégraphie des acteurs.

La simulation doit représenter la réalité de la façon la plus précise possible sur les points étudiés. Le graphisme, le rendu de texture, les ombres portées peuvent être représentés de façon rudimentaire si la simulation ne porte que sur la déformation de structures, pour reprendre l'exemple du crash de la voiture. En revanche, la réalité virtuelle doit donner l'illusion la plus parfaite de représenter la réalité sous tous ses aspects en prenant éventuellement ses distances avec les phénomènes physiques qu'elle est sensée représenter. Nous verrons plus loin comment un son non réaliste peut donner l'illusion parfaite d'une excellente représentation de la réalité.

Pour conclure temporairement sur cette question, nous rappellerons les propos d'Yves Burkhardt (2003) dans l'introduction de son article sur l'ergonomie de la Réalité Virtuelle. Il y rappelle que les trois piliers sur lesquels s'appuie la Réalité Virtuelle sont la présence, l'immersion et le réalisme. Le réalisme est sans doute ce qui rapproche le plus la Réalité Virtuelle de la simulation car les deux cherchent à l'atteindre. Mais l'immersion et la présence vont l'en éloigner. La première en faisant oublier à l'utilisateur qu'il n'est que le spectateur que d'une simulation, la seconde en lui permettant de devenir même un acteur à part entière de cette simulation. Et autant le spectateur ne faisait que regarder, autant l'acteur va vouloir agir dans un monde qui devra réagir en conséquence.

La problématique

Le problème à résoudre est donc le suivant □ par exemple : un constructeur automobile souhaite sortir un nouveau modèle de véhicule pour le nouveau modèle de famille recomposée avec de nombreux enfants dans des tranches d'âge différentes. Il fait

travailler ses équipes marketing pour connaître les besoins d'une telle famille. Il en résulte un cahier des charges qui est soumis aux designers qui, à leur tour, vont produire une description graphique ou conceptuelle de ce que sera la voiture idéale pour cet utilisateur. Ce sont alors les ingénieurs et les techniciens du bureau d'étude qui vont dessiner les plans de ce futur véhicule. Voilà, le véhicule existe maintenant dans la mémoire des ordinateurs. Avant de lancer la fabrication, le constructeur est saisi d'un doute. Entre le moment où le marketing a interrogé le père de famille et celui où la voiture est prête à être construite, l'utilisateur potentiel n'a plus été consulté. Certes la démarche suivie a été rigoureuse mais un petit recalage entre le besoin exprimé et la réponse à ce besoin serait bien utile. Sans la réalité virtuelle, le constructeur précautionneux demanderait la réalisation d'un prototype pour le faire tester par la famille modèle. Mais c'est long, c'est coûteux et, pendant ce temps, la concurrence qui s'est intéressée au même marché, menace de sortir son produit en premier. Grâce à la réalité virtuelle, le constructeur automobile va pouvoir soumettre à son futur client son futur produit avant d'avoir commencé d'en serrer le premier boulon.

Grâce à la représentation graphique 3D, l'utilisateur peut dire s'il sera fier d'être au volant du véhicule ou s'il aura l'impression d'être pris pour une poire. Grâce à l'immersion dans ce monde graphique virtuel, il pourra vérifier qu'une fois à l'intérieur du véhicule, il aura les moyens de surveiller aussi facilement le motard qui le double par la droite, l'idiot qui le colle de trop près dans ses rétroviseurs, le sommeil de ses plus jeunes enfants à l'arrière et les lectures des plus âgés dans les places du fond. Il faudra qu'il puisse aussi s'assurer qu'en allant chercher les bonbons dans boîte à gants, il aura les moyens de garder une main sur le volant et un œil dans le rétroviseur sans accrocher au passage le levier de vitesse ou taper dans les genoux de son épouse qui avait fini par s'endormir à côté de lui et qui ne peut donc pas attraper les bonbons à sa place. Le conducteur du véhicule virtuel pourra également dire ce qu'il pense du rendu de la boîte de vitesse et si les différentes commandes lui renvoient la sensation de solidité ou de sérénité qu'il attend dans un tel environnement.

Pour que tout cela soit possible, il faut non seulement afficher l'apparence visuelle du futur véhicule mais il faut aussi offrir aux yeux les trois dimensions auquel ils sont

habitués. Il faut être capable, en fonction de la position du conducteur, modifier ce qu'il est capable de voir □ quand il va chercher le bonbon qu'il aura fait tomber entre les jambes de sa femme, ne lui projeter que des images de moquettes devant les yeux. Il faut aussi pouvoir lui faire sentir dans les mains le contact avec son volant, le levier de vitesse, le fermoir de la boîte à gants, les collisions de son bras avec les genoux de sa femme. Sans parler du son horripilant de la Game Boy de ses plus jeunes enfants et des grands coups de klaxon du véhicule qu'il a failli harponner à cause du coup de volant qu'il a donné de façon involontaire en essayant de rattraper au vol le bonbon qui lui a glissé entre les doigts à la sortie de la boîte à gants.

On retrouve là tous les éléments constitutifs d'un système complet de réalité virtuelle □ l'immersion graphique 3D, le retour sonore spatialisé, la simulation dynamique du comportement des objets, le retour haptique et la capture de mouvement.

Les solutions du CEA

Tradition de simulation et de téléopération

Le Commissariat à l'Energie Atomique s'est retrouvé assez naturellement en bonne position pour fournir des solutions à un tel problème du fait de sa longue expérience en simulation et en téléopération.

Depuis toujours, les physiciens ont modélisé sous forme mathématique les phénomènes naturels. Depuis une bonne cinquantaine d'années, ils ont utilisé les outils informatiques pour implémenter ces modèles et les observer de plus près. Depuis ces dernières années, ils ont également succombé à la facilité d'exploiter les performances toujours grandissantes des cartes graphiques pour voir, comme s'ils y étaient, ce qui se passe au cœur des phénomènes physiques les plus complexes.

De la même façon, cela fait très longtemps que les travailleurs de l'atome ont besoin de manipuler de façon intuitive des objets qu'il n'est pourtant pas possible de toucher. Certaines sources radioactives sont aussi impossibles à toucher de la main que le levier de

vitesse d'une voiture qui n'existe pas encore, même si ce n'est pas pour les mêmes raisons. Le CEA a donc développé une expertise dans la conception de systèmes permettant de déplacer des objets à distance et de ressentir les efforts exercés lors de ces manipulations. Ce sont les systèmes de téléopération à retour d'effort basés sur couplage d'un bras maître, dans la main de l'opérateur, et d'un bras esclave qui effectue le travail en milieu hostile. En remplaçant les signaux mesurés sur le bras esclave par des signaux calculés par la simulation des phénomènes physiques correspondant, on obtient la sensation de manipuler des objets virtuels au travers du bras maître.

La plate-forme Phare

Sur le centre de Fontenay aux Roses, le CEA a développé la plate-forme Phare. Il s'agit d'un environnement immersif composé d'un système de projection en 3 dimensions sur deux écrans, l'un vertical devant l'utilisateur, l'autre horizontal sous ses pieds. Des projecteurs Barco assurent la restitution visuelle en 3D grâce à un système de stéréo active □ les images pour l'œil droit et l'œil gauche sont envoyées l'une après l'autre et les lunettes portées par l'utilisateur occultent, en opposition de phase, l'œil droit et l'œil gauche.

Pour adapter les images en fonction de la position de la tête de l'opérateur, et donc lui projeter une image de moquette quand il se baisse pour ramasser le bonbon tombé par terre, un capteur évalue en permanence la position des lunettes qu'il porte. Un émetteur ultra-sons est fixé sur la monture et des récepteurs situés au dessus de l'utilisateur en calculent la position. Pour évaluer la position des autres parties du corps de l'utilisateur, un système de capture de mouvement, développé par ActiCM une start-up du CEA, est utilisé. Basé sur le principe de la stéréo-vision, il permet de calculer en temps réel la position en 3D de petites billes réfléchissantes posées sur l'opérateur. Quatre colonnes portant chacune deux paires de stéréo-caméras et disposées aux quatre coins de l'environnement immersif permettent de détecter en permanence la position des petites mires.

Un système de sonorisation 3D permet générer un son spatialisé □ l'utilisateur peut savoir, à l'oreille et sans avoir à tourner la tête, si la profonde respiration qu'il entend vient de sa voisine, épuisée par sa conversation monotone, ou de ses petits passagers, écrasés par la digestion des frites de la dernière station service.

Enfin, des organes haptiques permettent de renvoyer dans les mains de l'opérateur les efforts générés par la manipulation des objets virtuels. Les deux bras «*Virtuose 6D*», développés par la société Haption sous licence CEA, donnent à l'utilisateur les mêmes sensations que s'il manipulait vraiment son volant ressentant, de façon réaliste, les à-coups accompagnant le passage sur les irrégularités de la chaussée. Les bras *Virtuose* sont qualifiés de 6D car ils permettent de renvoyer non seulement des efforts longitudinaux dans la main de l'opérateur selon les axes avant-arrière, droite-gauche et haut-bas mais aussi des couples en rotation autour de ces axes. C'est une particularité unique de ces bras.

Tout cela ne serait pas utile à grand chose si une simulation en temps réel ne calculait pas les images qu'il faut renvoyer aux yeux de l'utilisateur ainsi que les efforts qu'il faut lui renvoyer dans les mains. Deux PC sont chargés de cela. Le premier, en fonction de la scène et de la position de la tête de l'opérateur calcule les images qu'il faut projeter. Le second simule le comportement physique de tous les objets de la scène virtuelle. Il calcule en temps réel la distance entre tous les objets en mouvement et quand la distance s'annule entre deux objets, il calcule les forces et les couples échangés entre ces objets lors de la collision. Ce sont ces forces et ces couples qui seront renvoyés dans la main de l'utilisateur au travers de l'organe haptique. Pour illustrer l'importance de ce logiciel de simulation, qu'on appelle le moteur physique, nous précisons que c'est lui qui donne aux objets un comportement réaliste □ quand le bonbon virtuel glisse des doigts en sortant de la boîte à gants, le moteur physique calcule la trajectoire de sa chute jusqu'au sol, son rebond et sa trajectoire jusqu'à l'endroit le plus sombre et le plus inaccessible de l'habitacle du véhicule. Pour développer ce logiciel de simulation physique, nous nous sommes appuyés sur les bibliothèques de la société Havok qui sont notamment utilisées par des développeurs de jeux vidéos. Même si le lâcher de bonbons depuis une boîte à gants ne ferait sans doute pas un jeu à succès, les équations à mettre en œuvre sont les

mêmes que celles qu'il s'agit d'utiliser pour simuler le lancer d'une hache sur des morts vivants ou d'énormes rochers sur des rats mutants géants, situations beaucoup plus fréquentes et attrayantes pour les amateurs de jeux vidéos.

Les applications courantes

Aujourd'hui, les simulations qui sont réalisées dans la plate-forme Phare n'ont ni la banalité d'un départ de vacances en voiture ni l'attrait de la chasse aux morts vivants. A mi-chemin entre ces deux extrêmes, des constructeurs d'automobiles, de trains ou d'avions les utilisent pour vérifier que les futures machines qu'ils ont conçues seront aisées à monter, démonter ou réparer. En effet, le tout premier utilisateur de la voiture sera l'ouvrier en charge de l'assembler. C'est lui qui sera confronté à la difficulté d'installer le moteur de l'essuie-glace sous le capot ou celui du lève-vitre dans la portière. Les simulations actuellement réalisées sur la plate-forme Phare concernent le montage de systèmes mécaniques complexes.

C'est là, en fait beaucoup plus que sur les problèmes d'accès à la boîte à gants, que les systèmes de réalité virtuelle trouvent leur application la plus immédiate. Alstom, Renault, PSA, Dassault Aviation et Airbus nous soumettent leurs problèmes de montage pour que nous les testions sur la plate-forme Phare. En plus des problèmes cités précédemment, il faut se rendre compte que se superpose la grande complexité des pièces manipulées. Un objet issu de la conception assistée par ordinateur est composé de dizaines de milliers de facettes. Les calculs de distance, de détection de collisions doivent résoudre ces problèmes de combinatoire □ laquelle des 10000 facettes de l'objet 1 est la plus proche de laquelle des 10000 facettes de l'objet 2 □ Ce qui représente pour seulement deux objets dans la scène et si on n'y met pas un peu de subtilité, 100 millions de fois le calcul $d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ à chaque période de calcul, c'est à dire environ 100 fois par seconde. Le recours à la subtilité des modes de calcul de nos ingénieurs permet d'éviter l'usage intensif des super-calculateurs du CEA qui ont fort à faire avec d'autres types de simulations.

D'autres applications de la réalité virtuelle sont déjà pressenties pour la formation. Il est bien entendu envisageable de former un ouvrier qui doit faire le montage à la chaîne dans un environnement virtuel mais il sera quand même plus simple de le mettre sur la chaîne réelle. En revanche, pour des opérations plus délicates, comme par exemple les opérations chirurgicales, il sera très rassurant pour les patients de savoir qu'un chirurgien débutant se sera fait la main sur un malade virtuel avant de s'attaquer à un malade réel. Cela représente une voie de rechange au travail sur cadavre déjà interdit dans certains pays.

Les développements à mener

Si la plate-forme Phare permet déjà de valider l'intérêt de la réalité virtuelle pour les applications que nous avons décrites et pour bien d'autres, il est clair que les domaines sur lesquelles son réalisme peut être amélioré sont nombreux.

Prise en compte de phénomènes mécaniques complexes

La plate-forme Phare, et notamment son moteur physique Havok, ne sait simuler que le comportement d'objets rigides dont la position est modifiable mais pas la forme. Hors, de nos jours, rares sont les systèmes composés uniquement d'éléments rigides. Les câbles, les durites, les pièces plastiques, les grandes tôles sont des objets déformables. La prise en compte de tels objets va compliquer énormément les calculs à effectuer en temps réel puisque non seulement il faut calculer la collision entre les objets mais ensuite évaluer la déformation des objets en contact avant d'en déduire les forces qui seront échangées entre les deux. Si ces calculs sont déjà pris en compte depuis longtemps par les logiciels de simulation mécanique, les exécuter en respectant les contraintes du temps réel de la réalité virtuelle relève du défi technologique.

En allant encore plus loin, il faut considérer que certains objets déformables iront jusqu'à la rupture si l'opérateur ne maîtrise pas sa force. Il s'agit alors de nouveaux phénomènes physiques qu'il faudra prendre en compte. Pour le montage d'une pièce flexible, les concepteurs doivent être sûrs que, lors de l'assemblage, des efforts de rupture ne seront pas atteints.

Dans le domaine de la simulation médicale, il n'y a pratiquement que des corps flexibles à prendre en compte dont la rupture est un phénomène crucial à prendre en compte. En outre, nombre de ces solides déformables contiennent des liquides dont il faut également simuler le comportement en cas de rupture. On conçoit sans peine qu'il y a là un champ d'investigation sans fin pour les amateurs de simulation numérique de phénomènes physiques.

La génération du son

Beaucoup de développements ont porté, on l'a vu, sur l'amélioration du rendu visuel et le retour d'effort. Mais, curieusement, un sens est aujourd'hui relativement négligé par les développeurs d'applications de réalité virtuelle □ l'audition. Un point assez frappant, quand on visite les systèmes les plus avancés de réalité virtuelle est que le visiteur a l'impression d'être entré dans le monde du silence ou d'être subitement devenu sourd. En effet, si depuis très longtemps, les ingénieurs savent enregistrer des sons, les restituer, les créer, les reconstituer, leur génération, en temps réel, en fonction du phénomène physique qui les génère, est encore à la limite de leurs possibilités. Il est toujours possible de jouer un son préenregistré quand deux objets bien définis rentrent en contact. Mais pour que ce retour sonore reste réaliste, il faut le moduler légèrement en fonction de l'effort échangé pendant le contact, de la vitesse tangentielle des deux objets en contact, de la réverbération de ce son en fonction de la pièce dans laquelle se passe la scène... Donc en général, la génération de sons frappe par son absence lors de simulation de contacts entre objets. En association avec le LIMSI, le CEA propose un sujet de thèse sur ce thème □ la génération temps réel de son.

Outre son utilisation pour augmenter le réalisme d'un phénomène virtuel, la génération de son peut être également utilisée pour enrichir, parfois de façon assez arbitraire, la compréhension des événements représentés en réalité virtuelle. Cet artifice est utilisé depuis longtemps par le cinéma. Dans le film *Microcosmos*, la bande son était quasiment entièrement synthétique, faisant entendre le craquement des mandibules de la sauterelle sur un brin d'herbe tendre comme si on y était alors que ce son n'a aucune existence

réelle. Néanmoins, cela a contribué énormément à l'immersion du spectateur dans cette scène infiniment petite qui serait sans doute restée bien lointaine de lui sans cela. Dans les films de science fiction, cet artifice est aussi couramment utilisé pour donner de la consistance à des créatures synthétiques □ le monstre d'Alien produit tout un tas de chuintements chitineux qui augmentent son potentiel de menace et les rôdeurs du monde réel de Matrix émettent un cliquetis métallique quand ils se déplacent qui les rend encore plus froids et plus menaçants.

Les illusions d'haptique

De la même façon, la génération d'un son bien contrôlé en accompagnement de la représentation graphique d'un contact entre deux objets virtuels donnera des informations très précises à l'opérateur sur la violence du choc, la nature des objets en contact et même leur densité. Il est même très probable, nous menons des études sur ce sujet, qu'il soit possible de diminuer la fidélité du retour d'effort en compensant la baisse de réalisme du retour tactile par un meilleur réalisme du retour sonore. Il serait alors possible de diminuer les performances de l'organe à retour d'effort tout en offrant une sensation tout aussi satisfaisante pour l'utilisateur.

Dans cet ordre d'idée, des expériences très concluantes ont été menées par le Collège de France sur le thème des illusions visio-haptiques (Lecuyer A, Burkhardt JM, Coquillart S, Coiffet P, 2001). Il s'agit ici de tromper le sens du toucher par un retour visuel adapté en conséquence. L'utilisateur est invité à appuyer sur deux tiges fixées chacune au bout d'un ressort. Quand il appuie sur l'une, il voit une colonne représentée sur l'écran de l'ordinateur grandir péniblement jusqu'au quart de la hauteur de l'écran. Quand il appuie sur l'autre tige, la colonne monte jusqu'en haut de l'écran. Sa perception du phénomène est immédiate □ la première tige est montée sur un ressort beaucoup plus raide que la deuxième et il a appuyé beaucoup plus fort sur la première. En réalité, les deux ressorts sont identiques et il a appuyé avec la même force que les deux tiges, l'illusion optique a donné le change à l'haptique. Il y a beaucoup à comprendre sur la complémentarité des sens de l'être humain. De cette compréhension, découlera la conception plus pertinente, et sans doute plus économique, d'interfaces haptiques.

L'ergonomie du système

Si les premières démonstrations faites dans les systèmes immersifs comme la plate-forme Phare donnent une bonne idée de l'intérêt de la réalité virtuelle, il faut reconnaître qu'elles demandent encore un peu de bonne volonté à l'utilisateur pour qu'il se sente vraiment immergé dans le monde virtuel. Si la restitution visuelle atteint des niveaux qui commencent à être satisfaisants, les systèmes de capture de mouvement et encore plus les interfaces haptiques sont très intrusifs. Les premiers nécessitent un équipement encore fastidieux de l'utilisateur, les seconds sont de magnifiques mécaniques mais qui représentent un encombrement certain de l'espace de travail. Ils sont également contraints par les systèmes de saisie □ un volant ne s'attrape pas de la même façon qu'un levier de clignotant. Il faut donc prévoir un organe haptique qui s'attrape comme le premier et un autre qui se manipule comme le second.

Une solution envisageable est celle d'un gant à retour d'effort qui pourrait renvoyer dans les doigts les efforts correspondant à la forme des objets manipulés. Ces gants étant eux-mêmes fixés à l'extrémité d'organes haptiques conventionnels de façon à fournir un point fixe qui permet de bloquer le mouvement général de la main. Dans le film *Minority Report* on voit d'ailleurs Tom Cruise enfiler des gants de données qui lui permettent de manipuler des objets projetés devant lui en trois dimensions mais même Hollywood n'a pas encore réussi à représenter un moyen de mettre du retour d'effort dans la manipulation d'objets numériques. Une solution que nous envisageons est celle de l'exosquelette porté entièrement par l'utilisateur et qui pourrait renvoyer des efforts sur toutes les parties du corps de l'utilisateur. Ça, Hollywood l'a souvent envisagé, plus pour démultiplier la force de l'opérateur, comme dans «*Alien 2*», que pour lui permettre des interactions avec le monde virtuel. Il faut dire qu'en fait de commodité d'utilisation, l'exosquelette n'est sans doute pas un modèle.

Il ne faut donc sans doute pas aller trop loin dans le retour d'effort en essayant de tout régler avec les interfaces haptiques. Pour la validation de manipulation dans un espace réduit, c'est sans doute une excellente solution mais pour résoudre des problèmes

d'accessibilité sur des plus grands volumes, la solution est à chercher ailleurs. Du côté des humains virtuels, sans doute.

Les humains virtuels

L'humain virtuel existe depuis longtemps. C'est lui que nous envoyons combattre les morts vivants cités plus haut. Nous lui donnons généralement des apparences avantageuses comme celles de Lara Croft. C'est le passage, pour les amateurs de jeux vidéo, de la vue subjective où nous voyons ce que voit le héros que nous contrôlons, à la vue objective qui nous permet de voir le héros dans son environnement. Il est alors beaucoup plus facile de voir, par exemple, pourquoi le héros ne peut plus reculer parce que nous voyons qu'il est dos à un mur. Tous les problèmes n'ont pas été résolus dans les jeux vidéo. Dans le domaine de la réalité virtuelle, si on confie à Lara Croft le soin de démonter un moteur d'essuie-glace ou de surveiller des enfants à l'arrière de son monospace, sa solution d'utiliser un lance roquette sera tentante mais peu applicable dans la réalité.

Il faut donc doter l'humain virtuel d'une intelligence suffisante pour qu'il comprenne sa mission et qu'il mette en œuvre les stratégies et la dextérité nécessaire à la réalisation autonome ou quasi-autonome de certaines parties de la tâche à réaliser. Les sujets qui intéressent les chercheurs sont par exemple la modélisation de la préhension pour qu'un humain virtuel saisisse convenablement un outil en fonction de l'opération qu'il a à réaliser avec et de l'environnement dans lequel il doit le réaliser. Cela permettrait notamment de vérifier simplement que notre conducteur père de famille peut manipuler le fermoir de la boîte à gants sans être gêné par le levier de vitesse ou les genoux de sa voisine endormie à moindre frais. On se rapproche alors des derniers travaux menés en planification de trajectoire où des logiciels calculent automatiquement la trajectoire d'un humain virtuel entre un point de départ et un point d'arrivée tout en évitant des obstacles. Ces techniques sont utilisées notamment pour simplifier l'animation de personnages des films en image de synthèse (Pette 2002). Là où elles ont besoin de l'aide des autres techniques de réalité virtuelle, c'est quand le personnage doit manipuler son environnement pour interagir avec lui. La planification et la réalité virtuelle doivent se

compléter pour aboutir à des humains virtuels simples à commander et interagissant de façon réaliste avec leur environnement.

Conclusion

Nous avons montré dans cet article comment il est désormais possible d'interagir de plus en plus simplement avec les mondes virtuels n'existant que dans la mémoire des ordinateurs. Grâce aux progrès de l'informatique mais aussi des capteurs et de la mécanique, un utilisateur peut se servir d'un objet avant même que celui-ci n'ait été fabriqué. Nous avons rappelé comment les jeux vidéo exploitent déjà cette possibilité de manipuler l'imaginaire et présenté des applications industrielles de ce concept qui doivent permettre de faire gagner un temps précieux dans les cycles de développement des objets manufacturés. Les voies d'amélioration des techniques de réalité virtuelle sont nombreuses et pourront alimenter pendant très longtemps les réflexions des chercheurs, ingénieurs et ergonomes. Il reste tant de sujets enthousiasmants à traiter. Mais nous, les scientifiques, nous devons toujours garder un œil critique sur nos propres travaux pour bien veiller à l'efficacité et à la rentabilité générale du système proposé afin de savoir toujours faire la part des choses entre la performance technologique et la réponse au besoin exprimé. Le travail main dans la main avec les plus grands industriels, tel que nous le pratiquons au CEA, est un bon moyen de rester lucide sur ce sujet.

Références

Burkhardt JM (2003) *Réalité Virtuelle et ergonomie □ quelques apports réciproques*. In «[Le travail humain](#)», tome 66, n°1/2003 (pp 65-91)

Lecuyer A, Burkhardt JM, Coquillart S, Coiffet P (2001). *Boundary of Illusion □ an experiment of sensory integration with a pseudo-haptic system*. In H.Takemura & K.Kiyokawa (Eds), IEEE Virtual Reality Conference (pp 115-122). Los Alamitos, CA - IEEE press.

Pettré J, Siméon T, Laumond JP (2002). *Planning Human Walk in Virtual Environments*. IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'02),