

ACTIVITÉS SENSORI-MOTRICES : APPORTS DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE A LA PSYCHOLOGIE ERGONOMIQUE

DANIEL R. MESTRE

1. INTRODUCTION

Depuis sa définition, la Psychologie Ergonomique a oscillé entre une approche sensori-motrice et une approche "cognitiviste" des déterminants de la performance humaine, et donc des concepts utilisés pour définir des conditions optimales de l'adaptation de l'homme à son environnement de travail. La sensori-motricité est en effet une vieille thématique de la discipline (cf. les travaux des années 50 sur les tâches de pointage, de détection de cibles, etc.). On peut en particulier se référer aux travaux de Fitts (1954) sur les mouvements de pointage visuellement guidés, qui ont démontré les relations entre la vitesse, la précision et l'amplitude d'un mouvement. La recherche des limites de la loi de Fitts a notamment permis de formuler des recommandations pour les conditions de réalisation de certaines activités manuelles.

Dans les années 70, l'essor de l'informatique a conduit à un ensemble de travaux sur les interactions homme-ordinateur et l'accent a été alors clairement mis sur le rôle des activités cognitives et symboliques dans le contrôle d'activités telles que la programmation (Weinberg, 1971), allant même jusqu'à qualifier ce type d'activités de "résolution de problème" (Sackman, 1970). On assiste pourtant depuis quelques années à un "renouveau" d'une approche sensori-motrice des interactions homme-machine (IHM). Par exemple, Pennel, Ferrel, Coello et Orliaguet (2002) abordent le problème des limites de la plasticité du système visuo-moteur (notamment à opérer des changements de cadres de référence spatiaux) dans les tâches de contrôle d'engins à distance (télé-opération). Il est probable que cette

approche renouvelée des IHM est liée à l'intérêt que les spécialistes de la sensori-motricité accordent aux situations de travail.

Sans rentrer ici dans la question de rapports de causalité, on peut remarquer que, parallèlement à cette évolution historique de la Psychologie Ergonomique, s'est développée, dans les années 80, une controverse dans le domaine du contrôle des comportements (pour une revue de la question, voir Meijer & Roth, 1988). D'un côté, nous avons les tenants d'une théorie classique du contrôle des comportements, impliquant une distinction claire entre la perception d'un côté et le contrôle moteur de l'autre, avec au centre un rôle important joué par les représentations internes (mémoires, schèmes, programmes, etc.). Ces représentations sont impliquées aussi bien au niveau de l'interprétation des données sensorielles qu'à celui de la préparation de l'action (Schmidt, 1988). De l'autre côté, les tenants d'une Psychologie Ecologique (Gibson, 1966), proposent que le couplage "perception-action" permet d'élucider les modes de contrôle de l'activité, sans recourir en première instance à des représentations dont la définition est, de plus, vague. Cette approche défend l'idée que perception et action sont inséparables : Ce que nous percevons dépend de nos actions, et nos actions dépendent de nos perceptions. En d'autres termes: Il faut percevoir pour bouger, il faut bouger pour percevoir.

De ce point de vue, on peut dire que le mouvement est le seul moyen dont nous disposons pour interagir avec le monde, que ce soit pour chercher de la nourriture ou pour communiquer avec autrui au moyen du langage parlé ou signé. Le rôle du cerveau est alors d'utiliser (de transformer) les signaux sensoriels pour déterminer nos actions futures. Le problème est alors d'élucider les règles (voire les substrats anatomiques) de ces transformations (voir par exemple Pouget & Snyder, 2000).

Dans ce contexte, nous mettons l'accent sur la perception visuelle du mouvement, qui, à côté de la perception visuelle statique, joue un rôle décisif dans le contrôle des comportements spatiaux. Trois aspects principaux retiennent notre attention. D'abord, il est maintenant bien reconnu qu'à côté de notre capacité à identifier avec une grande précision la structure d'un objet en vision centrale (ce qu'on peut appeler l'acuité visuelle statique), nous avons une capacité importante à percevoir le mouvement visuel, et que cette capacité joue un rôle important dans la perception de la structure de l'environnement et des événements qui y surviennent. Ensuite, et notamment lorsque

nous nous déplaçons, la perception visuelle implique l'ensemble de notre champ visuel, et non pas seulement la vision centrale. Enfin, la perception visuelle doit être conçue comme une activité sensori-motrice, et non pas seulement comme le résultat de la stimulation de récepteurs sensoriels passifs. La perception visuelle est alors fondamentalement active, dans la mesure où elle implique une activité motrice. C'est le cas lors du contrôle de nos déplacements où notre activité motrice produit une stimulation visuelle (un mouvement apparent de l'environnement visuel appelé flux optique) nécessaire au contrôle de notre déplacement (Warren, 1988 ; Mestre & Warren, 1989). C'est le cas plus généralement dans toutes les situations où, face à un événement qui survient dans l'environnement (produisant une stimulation visuelle spécifique), une activité motrice est déclenchée. Elle vise à optimiser tant le comportement du sujet que la prise d'information nécessaire à un contrôle précis de l'action. Par exemple, l'orientation du regard vers un objet aperçu en vision périphérique permet son analyse en vision fovéale. Il faut aussi noter, du point de vue expérimental, que le comportement moteur peut aussi être utilisé comme moyen d'étude de la perception visuelle (Mestre & Masson, 1997; Masson & Mestre, 1998).

C'est ainsi que le concept de sensori-motricité se retrouve au centre du débat. Dans l'exposé qui va suivre, nous chercherons à montrer que les avancées technologiques proposées par la Réalité Virtuelle permettent de développer cette approche. Ensuite, nous verrons comment la modélisation du contrôle des comportements basée sur les couplages sensori-moteurs peut être utilisée dans le cadre d'une démarche ergonomique. Finalement, nous essaierons de montrer rapidement que les processus cognitifs doivent forcément être intégrés dans ce cadre.

2. INTERACTIONS ENTRE ACTIVITÉS SENSORI-MOTRICES ET RÉALITÉ VIRTUELLE

2.1. HISTORIQUE

Au début était une Réalité Virtuelle (RV) ludique, basée sur le principe que l'interactivité et la stimulation de multiples sens donneraient à un utilisateur l'illusion de la réalité. Cette conception originelle (proche de la science-fiction) de la Réalité Virtuelle était liée aux arts et aux divertissements. Elle utilisait une compréhension naïve et intuitive du comportement humain, dans ses dimensions sensorielles et motrices. Bien vite pourtant, les premiers simulateurs ont commencé à proposer une utilité à la RV, notamment en termes de formation et d'apprentissage. Dans les années 80, la RV a été présentée comme un outil technologique puissant, a priori monopolisé par les Sciences de l'Information, et on aurait pu penser que les facteurs humains n'y avaient que peu de place, à part celle d'utilisateur. Néanmoins, les Sciences du Comportement ont vite compris l'intérêt des systèmes de RV, et en retour les techniciens de la RV ont compris l'intérêt de leur alliance avec les Sciences du Comportement, et notamment avec les études expérimentales de la sensori-motricité.

2.1.1. Définition

La Réalité Virtuelle est techniquement définie comme un dispositif informatique permettant à une (ou plusieurs) personnes de visualiser des données complexes et d'interagir avec ces données. Fuchs, Moreau et Papin (2001), dans leur récent *Traité de la Réalité Virtuelle*, notent que « la finalité de la Réalité Virtuelle est de permettre à une ou plusieurs personnes des activités sensori-motrices et donc mentales dans un monde artificiel, qui est soit imaginaire soit une simulation de certains aspects du monde réel » (p.5). Deux aspects essentiels sont à retenir: 1) La *visualisation est immersive*, c'est-à-dire qu'on cherche à donner au sujet la sensation que l'objet ou

l'environnement qu'il observe est réellement présent, qu'il est « à l'intérieur » du monde virtuel. 2) *Le sujet peut interagir avec le « monde virtuel »*. Cela est réalisé grâce à des systèmes de capteurs qui permettent de mettre à jour la visualisation en fonction de la position du sujet dans le monde virtuel, mais aussi une manipulation des objets présents dans le monde virtuel. Nous reviendrons sur les outils technologiques prodigieux mis au service de ces technologies, mais considérons, pour mieux saisir le concept, les origines de la Réalité Virtuelle.

2.1.2. Origines

Une première marque historique dans l'émergence de la Réalité Virtuelle a été le simulateur de vol nommé « *Link Trainer* » (Durlach & Mavor, 1995). Le *Link Trainer* (visible dans de nombreux musées d'aviation à travers les États-Unis) a constitué une contribution significative au développement de l'aviation. Il constitue la première version dans la longue lignée des simulateurs. Avant l'invention du *Link*, un pilote apprenait à conduire un avion grâce à l'instruction d'un autre pilote. Ce simulateur était basé sur une série de soufflets qui pouvait se gonfler et se dégonfler, afin de permettre au simulateur de se pencher, de s'incliner, pour simuler les mouvements d'un avion. En 1930, Ed link institua la « *Link Flying School* » à Binghamton, New York (USA). Le simulateur réduisit le coût des leçons de vol en permettant aux élèves pilotes d'apprendre au sol quelques rudiments des habiletés nécessaires au pilotage. L'engin fut ensuite doté d'instruments afin d'apprendre le vol aux instruments. Notons aussi qu'aucun retour visuel n'était présent sur ce dispositif. Le *Link* était donc une version fruste de simulateur de vol, du point de vue des retours sensoriels. Seuls étaient rendus les mouvements de la cabine de pilotage en fonction des manœuvres du pilote.

Le succès du *Link Trainer* comme instrument professionnel (et non simplement comme une attraction foraine) vint de l'intérêt de l'armée de l'air américaine, spécialement durant la seconde guerre mondiale. 10.000 simulateurs furent utilisés auprès de plus de 500.000 pilotes, pour augmenter la sécurité en vol et réduire le temps d'entraînement. De nos jours, des simulateurs de vol dérivés de ce premier prototype sont devenus partie intégrale de l'entraînement au vol.

En 1962, une étape importante vers la conception de dispositifs « multi-sensoriels » fut franchie. Le cinéaste et inventeur Morton

Heilig, basé à Hollywood (CA, USA) a breveté un jeu d'arcade, qu'il appela « *Sensorama* » (Burdea & Coiffet, 1994). Il s'agissait d'un dispositif mécanique, qui utilisait le mouvement, le son, les odeurs et même une brise de vent artificielle pour convaincre les utilisateurs qu'ils chevauchaient une motocyclette. De nos jours, cela paraît trivial, si l'on jette un œil dans une salle de jeux vidéos. Mais en ces temps-là, aucun jeu vidéo n'existait. L'objectif poursuivi par Heilig était d'offrir la « réalité pour un sou », une expérience multi-sensorielle qui incluait des poignées à retour d'effort, une vision stéréoscopique, et des parfums subtils.

À propos du *Sensorama*, Rheingold (1991), auteur d'une revue historique de la Réalité Virtuelle, nota plus tard qu'il existait de nombreux problèmes à résoudre (la latence entre les actions du pilote et les réactions de l'engin n'étant pas le moindre) avant que la Réalité Virtuelle ne devienne utilisable (et utile) grâce au développement de la puissance de calcul des ordinateurs

A partir de ces premières tentatives (voir aussi les travaux de Evans et Sutherland (Sutherland, 1965) et de Thomas Furness (Furness, 1988) entre autres), des progrès très significatifs ont été accomplis à la NASA, dans les années 80. Le projet VIVED (*Virtual Visual Environment Display*, cf. Fisher, McGreevy, Humphries, & Robinett, 1987) fut développé dans ce qui est devenu depuis le laboratoire VIEW (*Virtual Interactive Environment Workstation*). Ce projet développa un « simulateur » personnel, qui inclut finalement un système de mesure de la position spatiale de la tête et de la main, permettant notamment de mettre à jour une scène visuelle en fonction de la position de l'observateur dans un monde virtuel. Le système permet aussi une vision stéréoscopique, un son spatialisé (figure 1). Le gant « *dataglove* » mesurait les angles des doigts et incluait un système de mesure de la position et de l'orientation de la main dans l'espace. L'utilisateur pouvait ainsi, par exemple, attraper des objets dans le monde virtuel. Il constituait un exemple unique d'interface « naturelle », c'est-à-dire qui permet au sujet de se comporter dans le monde artificiel de manière « naturelle ». Le concept d'interface « naturelle » est un sujet de recherche en soi. L'interface naturelle est opposée, par exemple, à un dispositif de pointage classique (souris, clavier, etc.).

À l'aide d'un tel système, de multiples scénarios de Réalité Virtuelle, maintenant réellement interactive et immersive, furent développés, notamment la téléopération d'un bras de robot, des

missions spatiales, et la visualisation intensive de données dynamiques tridimensionnelles (Foley & Van Dam, 1982).



Figure 1. *Le système VIVED . Le sujet est immergé dans in monde interactif, qu'il perçoit grâce à un casque de visualisation permettant une vision stéréoscopique de l'environnement virtuel et à un son spatialisé, et dans lequel il agit grâce à des "gants de données" qui mesurent les positions des segments de sa main et de sa main dans l'espace.*

Finalement, le système CAVE (figure 2) fut développé à l'Université d'Illinois (Cruz-Neira, Sandin & DeFanti, 1993), dans le laboratoire EVL (*Electronic Visualization Laboratory*). Le système est très sophistiqué d'un point de vue visuel, puisqu'il se compose de trois murs de projection et d'un sol, permettant d'immerger le sujet (visuellement, mais aussi auditivement, grâce à un système quadriphonique). En particulier, le champ visuel du sujet peut ainsi être complètement occupé par la stimulation visuelle. Le système utilise un ensemble de techniques de capture du mouvement et des positions de l'utilisateur, permettant de calculer en temps réel la position du sujet (tête et membres) dans le monde virtuel. Cela permet de remettre à jour les stimulations sensorielles correspondantes, en temps réel, grâce à la puissance d'ordinateurs graphiques. Ce dispositif est maintenant décliné selon de nombreuses variantes, suivant les besoins des utilisateurs, et devient un standard (en particulier dans le monde de la conception industrielle). Il permet d'optimiser les caractéristiques immersives (par rapport à un écran classique ou encore à un casque de réalité virtuelle, cf. Fuchs *et al.*, 2001).

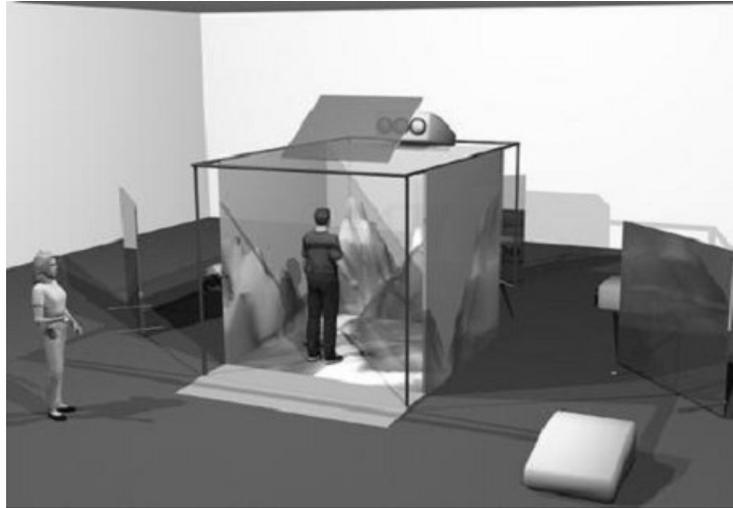


Figure 2. La "chambre Immersive" (CAVE). Dans cette vue d'artiste, on peut voir que le dispositif est "à taille humaine", le sujet étant immergé dans un ensemble de 3 écrans (+ le sol), alimentés par des rétroprojecteurs, connectés à des ordinateurs graphiques.

2.2. REALITE VIRTUELLE ET ACTIVITES SENSORI-MOTRICES

Le type de dispositif évoqué ci-dessus est tout à fait susceptible de faire avancer l'état des connaissances dans le domaine des Sciences du Comportement (de la Psychologie aux Neurosciences), et notamment dans l'étude de la boucle « perception-action », pour ce qui est plus précisément des activités sensori-motrices. Il faut ici insister sur les capacités d'un tel dispositif, non seulement à générer des stimulations sensorielles multi-modales complexes, mais aussi à mesurer le comportement d'un sujet soumis à ces stimulations et finalement à moduler en temps réel les stimulations sensorielles. On peut ainsi pénétrer la boucle de régulation sensori-motrice, la manipuler pour mieux la comprendre. Cette manipulation peut porter par exemple sur la nature de l'information sensorielle, sur les moyens d'action dont dispose le sujet, sur les aspects spatiaux et temporels du couplage perception-action.

En retour, les Sciences du Comportement peuvent permettre d'apporter un éclairage nouveau à des questions "mal posées", telles que celle du rôle de l'immersion sensorielle et perceptive ou encore de l'interaction « temps-réel » dans les mondes virtuels. On peut donc penser qu'à terme le concept de Réalité Virtuelle peut constituer un terrain de convergence et d'enrichissement réciproque entre les domaines des Sciences de la Vie et des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication. Il faut enfin noter que le développement de ce type de dispositif est dépendant de contacts et de collaboration avec le milieu industriel (visualisation de données à haut débit, simulation, présentation de produits existants ou en projet).

Depuis longtemps, les chercheurs ont mis en œuvre des dispositifs expérimentaux dans lesquels ils ont cherché à contrôler et à manipuler les informations sensorielles et les conditions de contrôle de l'activité dont disposent des sujets expérimentaux, afin de mieux comprendre les déterminants sensoriels, moteurs et cognitifs du fonctionnement de l'opérateur humain. De ce point de vue, les techniques de la Réalité Virtuelle ne sont pour les chercheurs que le développement de techniques déjà existantes. Pourtant, on assiste actuellement à la convergence et au progrès sans cesse accéléré, sous le terme générique de Réalité Virtuelle, de nombreuses techniques de stimulation sensorielle (vision tridimensionnelle stéréoscopique, son spatialisé, stimulations tactiles, etc.), de capture du mouvement humain (capteurs mécaniques, optiques, électro-magnétiques, vidéographiques) et d'interactions sensori-motrices en temps-réel (grâce notamment à la puissance accrue des systèmes informatiques et à la programmation parallèle des machines graphiques). Du point de vue des Sciences du Mouvement Humain, ces techniques constituent une avancée significative dans la faisabilité de l'étude du fonctionnement du sujet humain (ex. : Cruz-Neira, 1998), dans ses capacités de traitement de l'information, de contrôle moteur et de traitement cognitif (déterminants sensori-moteurs de la cognition et déterminants cognitifs du contrôle de l'activité). L'introduction de techniques de Réalité Virtuelle s'inscrit donc dans une approche « interactionniste » du bouclage « perception-action » et de l'étude « en temps réel » de la transformation sensori-motrice.

Les caractéristiques évoquées ci-dessus font partie de la définition même d'un système de Réalité Virtuelle, dans lequel on cherche à immerger un opérateur dans un monde virtuel, Par exemple, le but est, dans une tâche de téléopération, de chercher à garantir les

conditions de la réussite de l'activité de l'opérateur. Dans une opération de marketing, le problème sera de donner au futur client une appréhension « réaliste » du produit, telle qu'il ne sera pas déçu en présence du produit « réel ». Dans ce contexte, nous proposons qu'une approche « comportementale » de la Réalité Virtuelle peut permettre des avancées significatives au niveau des caractéristiques techniques d'un système de Réalité Virtuelle « efficace » (étant bien entendu que ces caractéristiques dépendent forcément de la finalité du système lui-même).

2.3. UN EXEMPLE : LE PROBLEME DES DELAIS TEMPORELS

Un "lieu" exemplaire de dialogue entre RV et activités sensori-motrices est celui des délais qui existent (toujours) entre la mesure de l'activité du sujet et le retour sensoriel. En manipulant expérimentalement ces délais et/ou les différents délais entre différentes modalités sensorielles (ex. : visuelle et haptique — sens du toucher), on pourra chercher à fournir aux techniques de Réalité Virtuelle des recommandations (en particulier au niveau des techniques de stimulation sensorielle, d'interfaces motrices et d'interaction « temps-réel ») issues d'études comportementales. Il s'agit là donc simplement d'une valorisation de données acquises.

Au niveau expérimental, les effets des délais sur l'exécution de tâches telles que la poursuite d'objets avec des systèmes couplés aux mouvements de la tête ou de la main, ou encore des tâches de conduite simulée ont été largement et depuis longtemps étudiés. Par exemple, So et Griffin (1995) ont montré, dans des tâches de capture d'une cible statique avec un pointeur couplé aux mouvements de tête, que la performance de l'opérateur se dégradait pour des délais supérieurs à 70 ms. Des délais temporels dégradent aussi la performance dans des tâches où c'est la main qui est utilisée comme « outil » de contrôle. Par exemple, aussi bien dans des tâches où il s'agit de conserver un objet à l'intérieur d'une zone qui bouge de manière imprévisible que de placer des objets dans des zones déterminées, des délais supérieurs à 100 ms dégradent sérieusement la performance (Liu, Tharp, French, Lai & Stark, 1995). Dans des tâches de simulation de la conduite, Frank, Casali et Wierville (1988) ont aussi observé une dégradation de la performance pour des délais de l'ordre de 170 ms. Nous voyons donc déjà que l'effet des délais

varie en fonction de la tâche et du système de contrôle impliqué (ce qui est forcément en partie dû à des aspects neuro-biologiques des systèmes de contrôle sensori-moteurs, que nous ne développerons pas ici, mais qui justifient une approche neuroscientifique du problème). Il faut aussi noter que les délais peuvent avoir plusieurs sources : délais dus à la fréquence d'échantillonnage du système de mesure du mouvement, à des délais de transmission entre différents dispositifs, temps de calculs, mais aussi à la fréquence de rafraîchissement des retours visuels. Liu *et al.* (1995) ont aussi étudié l'effet des taux de rafraîchissement de la stimulation visuelle. On observe classiquement une baisse de performance, dans des tâches de poursuite, pour des taux de rafraîchissement inférieurs à 10 images par secondes (Hz). Pour ces taux de rafraîchissement bas, on observe classiquement une dégradation des mouvements de poursuite qui deviennent saccadés, suggérant que le sujet réalise alors une tâche de réduction d'erreurs successives et non plus une tâche de poursuite « continue ». Le problème se complexifie encore si on considère que l'effet des délais est aussi lié aux caractéristiques même des mouvements impliqués, notamment de leur amplitude, mais aussi aux dimensions angulaires du dispositif de visualisation.

En particulier, dans le cas de mouvements de la tête (dispositif de couplage largement utilisé dans les environnements immersifs dans lesquels on cherche à réactualiser l'image 3D en fonction de la position de la tête de l'observateur), les délais vont introduire des erreurs de position qui sont proportionnelles à la vitesse du mouvement de tête (Bryson & Fisher, 1990). Dans ce contexte, So & Griffin (1995) ont montré, pour des délais compris entre 40 et 200 ms, une erreur de poursuite proportionnelle à la vitesse de la cible. Il est aussi à noter que certains auteurs ont noté que, dans le cas de délais importants, une réaction des sujets est alors de limiter leurs mouvements, ce qui n'est pas vraiment le but recherché dans un système de visualisation interactive. Il faut donc retenir que les effets de délais temporels dans le couplage « action-perception » seront de toute évidence dépendants du type de mouvement (amplitude et vitesse notamment) que les opérateurs auront à réaliser.

Un autre aspect important du problème est celui de l'étendue du champ de vision. En effet, la taille du dispositif de visualisation peut affecter les mouvements (de tête notamment) réalisés par le sujet, et donc les erreurs de déplacement de l'image causées par les délais temporels. En particulier, en comparant des casques de visualisation

possédant des largeurs de champ inférieures à 60 degrés et des dispositifs panoramiques (type CAVE), certains auteurs ont remarqué que les sujets avaient moins de mouvements de tête à faire avec des dispositifs « grand angle », ce qui réduisait naturellement l'effet des délais (Woodruff, Hubbard & Shaw, 1990).

3. CONSÉQUENCES POUR LA PSYCHOLOGIE ERGONOMIQUE

Jusqu'ici les relations entre étude des activités sensori-motrices et Psychologie Ergonomique ont été présentes en filigrane, à travers des exemples d'utilisation de la Réalité Virtuelle. Nous allons maintenant nous attacher à traiter de manière plus directe des relations réciproques entre ces deux domaines, qui sont tous les deux profondément interdisciplinaires.

Il faut avant tout remarquer que les laboratoires pionniers dans le domaine sont nés de groupe spécialistes à la fois de l'Ergonomie et de l'Informatique. Parmi tant d'autres laboratoires, on peut citer le *Virtual Reality Applications Center* (VRAC, Iowa State University, www.vrac.iastate.edu) qui se spécialise notamment dans l'interface Homme-Machine.

Dans le domaine de la conception d'abord, on peut noter (avec les réserves évoquées ci-dessus) des cas réussis d'introduction de techniques de Réalité Virtuelle dans le cycle de conception. C'est par exemple le cas chez Peugeot, qui utilise un dispositif immersif (le MOVE) dans la définition des caractéristiques de ses nouveaux modèles de véhicule (www.peugeot.fr). Plus généralement, le lecteur peut se référer à l'article de Burkhardt (2003) qui traite directement des liens entre Réalité Virtuelle et Ergonomie, en évoquant notamment les principaux domaines d'applications de la Réalité Virtuelle que sont l'assistance à l'activité, la formation, l'analyse du travail et la conception de nouveaux outils et de nouvelles situations de travail.

Un exemple intéressant d'applications des technologies de la Réalité Virtuelle est constitué par les travaux réalisés au Centre d'Ergonomie de l'Université du Michigan. Les études en cours portent principalement sur l'analyse, au moyen de techniques de capture tridimensionnelle du mouvement, de mouvements d'atteinte d'objets

chez des opérateurs. Ces analyses permettent d'améliorer la conception de véhicules et de postes de travail. Le but est donc, à terme, d'éliminer (ou tout au moins de réduire) le recours à des prototypes « réels » pour juger de la validité de choix de conception.

En quelques mots, le but du Laboratoire de Simulation du Mouvement Humain (HUMOSIM) est d'obtenir, sur la base de la capture de mouvements réels, des prédictions réalistes de mouvement humain dans différentes situations. Il s'agit donc clairement d'une contribution de technologies issues du monde de la Réalité Virtuelle à l'Ergonomie « physiologique » de conception. Les outils proposés par HUMOSIM permettent en particulier d'intégrer très tôt les facteurs humains dans le cycle de conception.

Au-delà de ce type d'applications "génériques" de la RV au domaine général de l'Ergonomie, on peut évoquer plus directement ici comment les études de la sensori-motricité, développées en particulier grâce aux techniques de Réalité Virtuelle peuvent avoir des conséquences positives directes sur la Psychologie Ergonomique. Nous évoquerons ici deux exemples.

3.1. EXEMPLE 1 : DEFINITION D'UNE AIDE VISUELLE POUR LA PREVENTION DES SORTIES DE ROUTE.

Ce travail est réalisé dans le cadre de programmes interministériels PREDIT (amélioration des conditions de sécurité des transports), notamment dans le cadre du projet ARCOS (Action de Recherche pour une CONduite Sécurisée). S'il est vrai que l'utilisation des simulateurs dans le cadre de la Psychologie Ergonomique n'est pas très nouvelle, cet exemple illustre l'utilisation que nous faisons d'un simulateur de conduite (situation réduite par rapport à une vraie tâche de conduite, notamment du point de vue des informations sensorielles), dans le double but (1) de comprendre les contrôles sensori-moteurs impliqués dans la tâche de conduite et (2) de proposer des prototypes d'aide à la conduite (Mestre, Mars, Durand, Vienne & Espié, 2004). Nous cherchons en particulier à étudier la perception active du conducteur, en mesurant son comportement oculomoteur, de manière à élaborer un modèle cybernétique du contrôle visuel de la trajectoire d'un véhicule.

À partir de l'analyse du pattern de flux optique généré par un observateur en mouvement et de la mesure de la direction du regard du conducteur lors de la prise d'un virage, des études précédentes ont suggéré que l'observateur avait tendance à fixer le point tangent (point de corde : voir Land & Lee, 1995) du virage et que cette stratégie de fixation du regard pouvait s'expliquer par une optimisation de la prise d'information utile au contrôle du déplacement.

L'objectif appliqué de ce travail est donc d'étudier, en situation interactive, comment cette stratégie perceptive « naturelle » peut ici être utilisée pour définir une aide visuelle au contrôle de trajectoire en virage.

Les expérimentations réalisées sur ce simulateur présentent deux particularités. Premièrement, le point de corde lié à la trajectoire du sujet dans un virage peut être calculé et figuré en temps-réel dans la scène visuelle (figure 3, gauche). Deuxièmement, un système d'analyse en temps-réel des mouvements oculaires (figure 3, droite) permet d'étudier les interdépendances entre la qualité du contrôle de trajectoire, la stratégie de fixation oculomotrice des sujets et la figuration du point de corde.



Figure 3. *Le simulateur de conduite permet de générer en temps-réel la scène visuelle correspondant au déplacement du conducteur dans l'environnement routier. Le simulateur inclut un retour sonore spatialisé et un retour d'effort sur le volant. À gauche, la scène visuelle correspond à une situation de prise de virage. Le point de corde est représenté, en temps réel, par la borne blanche. Il est un indicateur direct de la qualité de la trajectoire. À droite, photo du dispositif expérimental. Noter le système de mesure des mouvements oculaires, sur la tête du sujet. Le système développé permet de recalibrer la direction du regard du conducteur dans la scène visuelle.*

3.2. EXEMPLE 2 : ÉVALUATION DE L'ADAPTATION HOMME-MACHINE BASEE SUR UN MODELE BIOLOGIQUE

Dans la même ligne d'idée que l'exemple précédent, nous pouvons aussi appliquer notre démarche à la téléopération d'un engin mobile, dans le cadre de la définition d'une interface homme-machine. De nombreuses études ont montré que le guidage visuel de la locomotion humaine est sous-tendu par un processus d'anticipation visuelle sur le mouvement (Grasso, Glasauer, Takey & Berthoz, 1996). L'architecture temporelle de la coordination visuo-motrice semble organisée depuis les organes supportant la vision (yeux et tête) jusqu'aux membres locomoteurs, selon une stratégie du type « je vais là où je regarde ». Nous avons étudié dans quelle mesure l'implémentation d'une telle anticipation visuo-motrice sur un robot téléopéré pouvait s'avérer efficace. Afin d'analyser le niveau de réalisme qu'il est nécessaire de respecter vis-à-vis du modèle humain,

nous avons implémenté cette anticipation selon deux sens de couplage visuo-locomoteur (Rybarczyk, Mestre, Hoppenot & Colle, sous presse). Les résultats montrent que plus la coordination caméra-plateforme mobile est similaire, notamment dans ses aspects temporels, à l'organisation du comportement humain, plus le pattern de déplacement du télérobot se rapproche du comportement humain naturel. De plus, c'est uniquement dans la condition où le couplage visuo-moteur suit une organisation temporelle de « type-humain » (l'opérateur contrôle la caméra mobile placée sur l'engin, qui détermine en conséquence la direction du déplacement de l'engin) que la loi biologique de puissance (Lacquaniti, Terzuolo & Viviani, 1983), reliant la géométrie à la cinématique du mouvement, est conservée. Cette étude montre qu'un engin téléopéré pourrait parvenir à un haut niveau d'intégration au sein des schèmes de son utilisateur, à condition que son mode de fonctionnement soit fidèle à l'organisation sensori-motrice du contrôle du comportement.

4. CONCLUSION

À travers cette trop rapide revue de la question des rapports entre les résultats issus d'études expérimentales des activités sensori-motrices et Psychologie Ergonomique, nous avons essayé de montrer que l'invention d'un « amas » technologique tel que la Réalité Virtuelle a suscité des intérêts, aussi bien au niveau de l'étude de la sensori-motricité que de la Psychologie Ergonomie, qui viennent pour une part de l'antériorité et de la paternité de ces domaines de recherche sur un domaine aussi novateur que celui de la Réalité Virtuelle. Il apparaît en effet que la Réalité Virtuelle est un formidable outil pour l'étude de ces mécanismes, puisqu'elle permet de « fabriquer » une boucle « perception-action » manipulable. Nous avons illustré notre propos de quelques exemples, qui montrent tout l'intérêt de ces avancées technologiques, en particulier en ce qui concerne leurs conséquences potentielles pour l'avancée des connaissances dans le domaine de la Psychologie Ergonomique.

Il faut cependant relativiser notre propos, en notant que nous avons ici mis l'accent sur les contrôles sensori-moteurs, en excluant « caricaturellement » de notre analyse l'intervention des processus symboliques dans le contrôle des comportements. Ce point de vue est

évidemment outrancier et il est important de prendre, à terme, en compte une boucle « perception-cognition symbolique-action », dans laquelle des processus cognitifs symboliques interviennent dans les lois de transformation des données sensorielles en commandes motrices. En ce qui concerne la Réalité Virtuelle elle-même, un problème qui est aujourd'hui au centre des débats est le concept de « présence » (Minsky, 1980; voir aussi Burkhardt, Bardy & Lourdeaux, sous presse). En particulier, dans quel sens le fait que l'acteur se sente « à l'intérieur d'un monde virtuel » modifie-t-il son comportement, et cette sensation a-t-elle des implications sur la généralisation des résultats observés dans un environnement virtuel au monde réel (toujours le problème du transfert) ? Si l'on prend l'exemple du « prototypage virtuel », on peut supposer que la « sensation de présence » augmentera les chances de la validité des choix faits par les opérateurs en présence du modèle virtuel du dispositif qui sera réellement construit. Il faudra alors, pour chercher à garantir une sensation de présence, prendre en compte non seulement les caractéristiques « physiques » de la simulation, mais aussi, notamment, les caractéristiques psychologiques des utilisateurs. On peut aussi noter que la présence n'est pas forcément un but en soi dans toute situation. Par exemple, il peut exister des situations de télé-intervention dans lesquelles le sujet doit garder une « distance » avec le milieu dans lequel il intervient, et que la sensation de présence serait alors nuisible à son opération. Ici encore, la nature de la tâche et la recherche de l'information efficace doivent être prises en compte pour définir un système « efficace », notamment dans ses dimensions de fidélité par rapport à une situation de référence. Un travail préalable d'analyse de l'activité est donc requis.

Un autre sujet de débat concerne les effets indésirables des systèmes Réalité Virtuelle, qui pourraient, si l'on recherche l'utilité d'un système de Réalité Virtuelle en termes d'avancées des connaissances dans le domaine de la Psychologie Ergonomique, rendre « le remède pire que le mal ». Dans les situations de Réalité Virtuelle, l'immersion (liée non seulement aux caractéristiques de la stimulation sensorielle mais aussi à la nature de l'interaction homme-système) peut conduire à des « effets secondaires » semblables à ceux qui ont été observés depuis longtemps dans des simulateurs de conduite ou de vol possédant des dispositifs de visualisation « grand angle » (Regan, 1995). Cette « maladie des simulateurs » n'est pas sans rappeler le « mal des transports », dont les origines sont encore

peu ou mal connues. Ces effets indésirables semblent résulter (en partie au moins) de conflits sensoriels (Berthoz, 2001). Dans ce cadre, il faut bien reconnaître que la sophistication croissante des systèmes de Réalité Virtuelle (interactions multi-modales) est de nature à favoriser ces problèmes potentiels. En particulier, il est couramment admis que les situations qui provoquent des « malaises » sont liées à des conditions dans lesquelles les signaux de mouvements transmis par les yeux, le système vestibulaire et le système proprioceptif sont en conflit ou ne sont pas conformes aux attentes « sensorielles » du sujet (en fonction de son action). On retrouve ici, entre autres, le problème des délais temporels liés aux dispositifs d'interaction (capture du mouvement, temps de calcul, retour visuel), puisqu'il est admis que des délais entre le mouvement du sujet (de sa tête en particulier) et les déplacements consécutifs de l'image visuelle de l'environnement sont une source de conflit visuo-vestibulaire dans la perception du mouvement de soi.

Nous voyons donc que beaucoup de travail, tant fondamental qu'appliqué, reste à faire pour définir un système de Réalité Virtuelle "efficace", au sens des conclusions qui peuvent être tirées des travaux expérimentaux qu'il permet et de leur généralisation au monde "réel". Dans ce contexte, il faut aussi remarquer les phénomènes d'adaptation aux conflits sensori-moteurs induits par les simulateurs (Crowley, 1987). Il faut se méfier de cet apparent rôle positif de l'expérience. En effet, après une adaptation réussie au simulateur, on peut observer des problèmes de réadaptation au monde "réel". On peut aussi supposer que cette adaptation à des conditions d'interaction "anormales" peut conduire à des comportements eux-mêmes anormaux, ce qui peut poser des problèmes si on cherche à assurer des conditions de transfert positif (au sens large, aussi bien transfert d'apprentissage que prédiction correcte de la réalisation d'un prototype virtuel) de la Réalité Virtuelle vers le monde réel.

Il apparaît donc que les solutions qui doivent être adoptées dans la conception, l'utilisation et la recherche de pertinence d'un système de Réalité Virtuelle dépendent fortement des caractéristiques de la tâche et de l'utilisateur. Il y a donc ici nécessité d'intervention de l'Ergonomie, en amont des études expérimentales. Face à un problème donné, la solution adoptée repose autant sur des réponses (qui sont loin d'être toutes disponibles) provenant des sciences fondamentales concernant le comportement du sujet dans ses aspects neuro-psycho-physiologiques que sur la recherche d'un compromis entre les

nécessités d'une situation de Réalité Virtuelle interactive et immersive et les solutions technologiques aujourd'hui disponibles.

BIBLIOGRAPHIE

- Berthoz, A. (2001). *Le sens du mouvement*. Paris: Odile Jacob.
- Bryson, S., & Fisher, S.S. (1990). Defining, modeling and measuring system lag in virtual environments. *Stereoscopic Displays and Applications*, 1256, 98-109.
- Burdea, G. & Coiffet, P. (1994). *Virtual Reality Technology*. New-York: Wiley.
- Burkhardt, J.M. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie. *Le Travail Humain*, 66, 65-91.
- Burkhardt, J.M., Bardy, B., & Lourdeaux, D. (sous presse). Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. *Psychologie Française*.
- Crowley, J.S. (1987). Simulator sickness: a problem for army aviation. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 58, 355-357.
- Cruz-Neira, C. (1998). Making Virtual Reality Useful: Immersive Interactive Applications. *Journal of Future Generation Computer Systems*, 14, 147-156.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D.J., & DeFanti, T.A. (1993). Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE. *ACM Computer Graphics*, 27, 135-142.
- Durlach, N.I., & Mavor, A.S. (1995). *Virtual Reality: Scientific and Technological Challenges*. Washington DC: National Academy Press.
- Fisher, S.S., McGreevy, M., Humphries, J., & Robinett, W. (1987). The Virtual Environment Display System. *Proceedings of the 1986 workshop on Interactive 3D graphics* (pp. 77-87). New-York: ACM Press.
- Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- Foley, J.D., & Van Dam, A. (1982). *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*. Boston: Addison-Wesley.

- Frank, L.H., Casali, J.G., & Wierville, W.W. (1988). Effects of visual display and motion system delays on operator performance and uneasiness in a driving simulator. *Human Factors*, 30, 201-217.
- Fuchs, P., Moreau, G., & Papin, J.P. (2001). *Traité de la Réalité Virtuelle*. Paris: Presses de l'École des Mines.
- Furness, T. (1988) Super Cockpit' Amplifies Pilot's Senses and Actions, *Government Computer News*. August 15, 76-77.
- Gibson, J.J. (1966). *The Senses Considered as Perceptual Systems*. Boston: Houghton Mifflin.
- Grasso, R., Glasauer, S., Takei, Y., & Berthoz, A. (1996). The predictive brain : anticipatory control of head direction for the steering of locomotion. *NeuroReport*, 7, 1170-1174.
- Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54, 115-130.
- Land, M., & Lee, D.N. (1995). Which parts of the road guide steering? *Nature*, 377, 339-340.
- Liu, A., Tharp, G., French, L., Lai, S., & Stark, L. (1993). Some of what one needs to know about using head-mounted displays to improve teleoperator performance. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9, 638-648.
- Meijer, O., & Roth, K. (Eds.). (1988). *Complex Movement Behavior: The motor-action controversy*. Amsterdam: North-Holland.
- Masson, G., & Mestre, DR. (1998). A look into the black box: eye movements as a probe of visual motion processing. *Current Psychology of Cognition*, 17, 807-829.
- Mestre, D.R., & Masson, G. (1997). Ocular responses to motion parallax stimuli: the role of perceptual and attentional factors. *Vision Research*, 37, 1627-1641.
- Mestre, D.R., & Warren, W.H. (1989). Le flux optique. Son rôle lors du contrôle du déplacement. *Psychologie Française*, 34, 1, 5-11.
- Mestre, D., Mars, F., Durand, S., Vienne, F., & Espié, S. (2004). A visual aid for curve driving. Communication presented at 8th Driving Simulation Conference. Paris, France, Sept.
- Minsky, M. (1980). Telepresence. *Omni*, 2, 45-51.

- Pennel, I., Ferrel, C., Coello, Y., & Orliaguet, J.P. (2002). Contrôle sensori-moteur en situation de téléopération: Données théoriques et perspectives ergonomiques. *Le Travail Humain*, 65, 29-58.
- Pouget, A., & Snyder, L.H. (2000). Computational approaches to sensorimotor transformations. *Nature Neuroscience*, 3, 1192-1198.
- Regan, E.C. (1995). An investigation into nausea and other side-effects of head-coupled immersive virtual reality. *Virtual Reality*, 1, 17-32.
- Rheingold H. (1991). *Virtual Reality*. London : Mandarin.
- Rybarczyk, Y., Mestre, D., Hoppenot, P., & Colle, E. (sous presse). Implémentation de mécanismes d'anticipation visuo-motrice en téléopération. *Le Travail Humain*.
- Sackman, H. (1970). *Man-Computer Problem Solving*. Princeton: Auerbach.
- Schmidt, R.A. (1988). Motor and action perspectives on motor behavior. In O. Meijer & K. Roth (Eds.). (1988). *Complex Movement Behavior: The motor-action controversy* (pp. 3-44). Amsterdam: North-Holland.
- So, R.H.Y. & Griffin, M.J. (1995). Effects of lags on human operator transfer functions with head-coupled systems. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 66, 550-556.
- Sutherland, I.E. (1965). The ultimate display. Proceedings of IFIPS Congress (pp. 506-508). New York, NY, USA, May.
- Warren, W.H. (1988). Action modes and laws of control for the visual guidance of action. In O. Meijer & K. Roth (Eds.). (1988). *Complex Movement Behavior: The motor-action controversy* (pp. 3-44). Amsterdam: North-Holland.
- Weinberg, G.M. (1971). *The Psychology of Computer Programming*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Woodruff, R.R., Hubbard, D.C., & Shaw, A. (1990). Comparison of helmet-mounted visual displays for flight simulation. *Displays*, 7, 179-185.