

Implémentation télérobotique de l'anticipation sensorimotrice pour optimiser la Coopération Homme-Machine

par Y. RYBARCZYK***, D. MESTRE*, P. HOPPENOT** et E. COLLE**

RESUME

Un enjeu majeur en téléopération est de chercher à réduire les écarts existant entre le fonctionnement de l'opérateur humain et celui de la machine. L'approche bionique, consistant à donner des propriétés des êtres vivants à un robot, est un moyen de diminuer efficacement la différence de nature entre le mode de fonctionnement de ces deux entités, biologique et mécanique. Dans l'étude expérimentale présentée ici, le comportement d'anticipation visuo-motrice observé chez l'homme lors du contrôle des déplacements a été implémenté sur une base robotique mobile commandée à distance par un opérateur. Dans cette situation, l'opérateur semble beaucoup plus à l'aise et réalise des trajectoires bien meilleures qu'un individu ayant à piloter un véhicule ne présentant pas ce « bio-mimétisme ». De plus, ce comportement de type humain a été implémenté suivant deux modes de couplage : la commande de la direction de visée d'une caméra embarquée déterminant la direction du déplacement ou bien la direction du déplacement déterminant la direction de la caméra. Les résultats montrent la supériorité du premier mode, ce qui confirme que la coopération homme-machine bénéficie de l'implantation sur l'engin téléopéré de modes de couplages proches du fonctionnement de ceux de l'opérateur.

Mots clés : téléopération, bionique, interfaçage homme-machine, coordinations visuo-motrices.

* Université de la Méditerranée, Institut de Neurosciences Physiologiques et Cognitives, FRE CNRS 2109, 13402 Marseille Cedex 20. E-mail : mestre@lnf.cnrs-mrs.fr.

** Université d'Evry, CEMIF – Laboratoire des Systèmes Complexes, FRE CNRS 2494, 91020 Evry Cedex. E-mail : philippe.hoppenot@ibisc.univ-evry.fr.

Introduction.

La source des difficultés que rencontre un opérateur dans le cadre d'une Coopération Homme-Machine réside dans l'écart fonctionnel existant entre l'Homme et la machine. En effet, les mécanismes de contrôle sensori-moteurs, qui d'ordinaire sont naturellement automatisés chez l'individu, nécessitent maintenant, par exemple, un enclenchement simultané de boutons, avec un nombre de combinaisons possibles très important (Gray & Wilson, 1988). Ainsi, les capacités du système robotique sont loin de permettre une analogie de mouvement avec les modes opératoires humains « naturels ». Les utilisateurs sont, en particulier, surpris par le retard et l'écart entre leur geste et les mouvements du robot qui engendre des trajectoires selon ses propres règles de fonctionnement (Gauthier & Beaubaton, 1987).

Par exemple, le rapport de temps entre la saisie d'un objet avec la main ou avec un télémanipulateur est couramment de 1 à 10. L'opérateur doit donc réapprendre l'exercice de ces fonctions élémentaires, médiatisées par le dispositif technique, prolongement du bras et de la main. Ce processus a ceci de particulier qu'il impose le ré-apprentissage des liaisons sensori-motrices. L'activité la plus simple exécutée quotidiennement, de manière automatique, telle que la saisie d'un objet, devient alors une activité dépendante des modalités de fonctionnement du dispositif de téléopération. Cela implique que les schémas sensori-moteurs de contrôle interne du mouvement doivent intégrer les propriétés fonctionnelles du dispositif (Pew, 1974 ; Schmidt, 1975).

Jusqu'à présent les moyens techniques mis en place pour réduire l'écart fonctionnel entre l'homme et la machine n'ont permis qu'une intégration relativement limitée des propriétés fonctionnelles de l'opérateur humain (Rabardel, 1993). C'est pourquoi notre étude a consisté à observer une approche « bionique » (discipline née de la fusion entre la biologie et la technologie informatique) de la Coopération Homme-Machine, afin de réduire plus efficacement la différence de nature entre le mode de fonctionnement de la machine et de l'Homme. Cette démarche consiste à rechercher chez les êtres vivants des modèles fonctionnels du couplage sensori-moteur, en vue de réalisations techniques mieux adaptées au contrôle d'engins robotisés (télémanipulation, téléopération). En effet, la nature a cet avantage sur l'ingénieur d'avoir mis des millions d'années pour élaborer des mécanismes biologiques, dont seuls les mieux adaptés ont été conservés au cours de la sélection naturelle. Le travail de l'ingénieur « bionicien » va donc être de chercher dans la nature la solution biologique existant au problème technique précis qu'il se pose. Cette source d'inspiration va des

caractéristiques morphologiques aux caractéristiques les plus neuro-fonctionnelles du modèle animal choisi.

Dans le cas d'une machine semi-automatique, où il existe un souci d'assimilation (au sens de Piaget) de l'engin par l'opérateur humain, le modèle animal naturellement choisi sera bien évidemment l'homme. Déjà au niveau morphologique, on conçoit des bras anthropomorphiques imitant les propriétés du bras humain pour créer des robots manipulateurs ayant une aisance de préhension propre à celle du corps humain (AAP). De même, d'autres recherches portent sur des polymères présentant les caractéristiques physiques de la peau humaine, afin d'assurer une meilleure force de grip lors de la saisie d'objets (Bar-Cohen, 2002). Sur le plan neuro-fonctionnel, on voit se développer l'idée d'une amélioration du système mécanique d'un robot par implémentation de stratégies adaptatives propres aux animaux supérieurs, et en particulier l'Homme, lorsqu'ils doivent faire face à des variations inattendues dans l'environnement. Par exemple, à partir de l'enregistrement de la modulation de l'impédance humaine en réponse aux modifications de la tâche, on élabore des robots présentant des préreflexes mimant l'activité musculaire de l'Homme, rendant l'engin beaucoup mieux adapté à l'utilisateur humain (Kazerooni, 1989).

La suite de l'article va donc détailler notre approche de la Coopération Homme-Machine consistant, suivant un modèle biomimétique, qui vise à s'inspirer des stratégies comportementales humaines pour répondre aux contraintes sensori-motrices d'un opérateur placé en condition de téléopération. Pour réaliser ce travail, il faut suivre une démarche chronologique propre à la conception d'un robot biomimétique. Celle-ci présente cinq étapes. Premièrement, il faut bien identifier le problème à résoudre afin de choisir le comportement naturel à imiter. Deuxièmement, ayant le comportement, on doit connaître la modélisation biologique du système comportemental. Troisièmement, à partir de ce modèle biologique on effectue la modélisation cybernétique. Quatrièmement, on implémente cette modélisation sur le robot. Et enfin, cinquièmement, on peut tester la validité expérimentale du robot « biomimétique » ainsi obtenu. C'est cette logique que nous allons suivre tout au long de l'article, en commençant par définir précisément les problèmes sensori-moteurs qu'engendre chez l'opérateur humain une situation de téléopération. Plus précisément, nous allons nous centrer sur une situation de téléguidage d'un engin dans l'environnement, avec la vision comme modalité sensorielle impliquée.

I – Contraintes sensori-motrices en situation de téléopération.

Un opérateur placé en condition de téléopération n'agit qu'indirectement sur l'environnement physique, par l'intermédiaire d'une machine, et ne perçoit également qu'indirectement les résultats de son action, sous forme d'une image vidéo. Cette situation où l'entité qui ordonne le mouvement n'est pas la même que celle qui l'accomplit, va entraîner un certain nombre de distorsions sensori-motrices préjudiciables à l'accomplissement de l'action.

En effet, en situation «naturelle», le guidage du mouvement s'effectue à partir d'une intégration des informations sensorielles afférentes des diverses modalités sensorielles dont dispose l'organisme. En particulier, il existe un dialogue continu entre les systèmes sensoriels visuel et proprioceptif. S'en suit un gain d'efficacité qui se caractérise par une meilleure précision et une réduction de la variabilité spatiale et temporelle de la réponse motrice.

Or, en téléopération, au-delà du fait que la restitution des informations kinesthésiques s'avère encore limitée (MacFarlane *et al.*, 1999 ; Rosen *et al.*, 1999), il y a un problème de décorrélation entre les paramètres spatio-temporels des déplacements segmentaires réalisés dans l'espace physique et ceux perçus sur l'écran 2D. Précisément, l'introduction d'un écran vidéo entre le geste perçu et le geste réellement effectué entraîne une absence de concordance entre les informations visuelles et proprioceptives (ou motrices), ce qui va obliger l'opérateur à réorganiser temporairement son espace d'action (Orliaguet & Coello, 1998). On peut citer par exemple, la dégradation du guidage du mouvement par manque de coïncidence entre l'axe du regard et la direction du mouvement.

Cette absence d'isomorphisme entre l'espace perçu et l'espace physique va contraindre l'opérateur à privilégier certaines modalités sensorielles sur d'autres. Ainsi, de nombreuses études ont démontré que la principale information sensorielle mise à contribution en téléopération est d'ordre visuel (Terré, 1990 ; Mestre & Péruch, 1995). C'est encore ce que viennent confirmer les travaux sur la restitution du sens du toucher, démontrant que la discrimination de textures ou de la résistance des surfaces s'avère plus efficace sous forme d'informations visuelles que kinesthésiques ou somatosensorielles (Grimbergen, 1997).

Le fait que la vision soit prioritaire sur tous les autres sens, signifie que les limitations technologiques dans cette modalité auront de lourdes conséquences sur la performance de l'opérateur. Or, quels que soient les progrès techniques mis au point pour augmenter le réalisme d'une scène visuelle, ceux-ci placent toujours l'observateur dans une situation

d'appauvrissement visuel. D'une manière générale, on observe une baisse de la performance à cause de la réduction des indices permettant en situation «naturelle» la perception de la structure de l'espace d'action (Massimo & Sheridan, 1989).

Plus précisément, des travaux ont montré qu'il y a une détérioration systématique de la performance, par rapport à une situation «naturelle», lorsqu'on utilise un écran vidéo (Smith & Smith, 1990). Ceci est notamment dû à des difficultés d'évaluation des distances et de la profondeur, distordues par l'interface et la caméra vidéo. Viennent s'ajouter à cela une dégradation d'indices monoculaires tels que la taille, la luminance ou l'accommodation, ainsi que la perte d'indices binoculaires comme la disparité et la parallaxe binoculaire (Reinhardt-Rutland, 1996).

Il faut aussi noter que ces contraintes ne se limitent pas à la qualité de l'image elle-même, mais concernent aussi le caractère dynamique de sa retransmission. En effet, une telle condition de vision indirecte entraîne une absence des indices de mouvement que sont le flux optique et la parallaxe de mouvement (Cornilleau-Pérèse & Gielsen, 1996), dont on connaît le rôle majeur dans le contrôle du déplacement (Gibson, 1979 ; Warren *et al.*, 1991). De plus, cette déficience sera amplifiée par la réduction de la taille du champ optique dont on sait, déjà en situation «naturelle», les conséquences négatives sur la précision spatiale (Coello & Grealy, 1997). Ainsi, on peut résumer les déficiences visuelles liées à la perception en téléopération suivant les limitations des paramètres visuo-temporels et visuo-spatiaux de l'image.

D'un point de vue temporel, la commande d'un engin téléopéré nécessite d'exercer sur lui un contrôle quasi continu. Pour cela, un tel système doit être capable de transmettre rapidement une grande quantité d'images depuis l'engin en question jusqu'à la station de contrôle ; sachant que lorsque cette fréquence de transmission de l'image diminue, la capacité de contrôle de l'opérateur diminue également (Vercher & Gauthier, 1992).

Malheureusement les limitations technologiques sont telles qu'il existe plusieurs sources de délais temporels. Elles sont liées au renouvellement des images vidéo, à la transmission des commandes de l'opérateur vers les organes de effecteurs de la machine et, en retour, des informations réponses vers l'opérateur (Held & Durlach, 1993). Le problème est d'autant plus complexe qu'il existe des interactions entre les délais liés au système de téléopération et les délais physiologiques des boucles de contrôle propres à chaque système sensori-moteur impliqué dans le contrôle des mouvements de l'œil, de la tête ou de la main.

Enfin, des travaux ont montré qu'un délai compris entre 50 et 100 millisecondes semble être une valeur maximale pour permettre la perception visuelle du mouvement (Lui *et al.*, 1993). De plus, il apparaît nécessaire d'avoir une fréquence de rafraîchissement uniforme et élevée pour assurer la perception directe du mouvement visuel sur un terminal de visualisation.

Sur le plan spatial, la téléopération pose le problème de la limitation du champ visuel exploitable par l'opérateur et, en particulier, du manque de vision périphérique (Hightower *et al.*, 1987 ; Miller & McGovern, 1988 ; Padmos & Van Erp, 1996). En condition « naturelle », la taille du champ visuel humain est d'environ 180 degrés. De nombreuses études ont testé l'effet de la taille de ce champ sur diverses tâches telles que la capture d'un objet en mouvement ou le contrôle de la locomotion (Leibowitz, 1986). Des résultats convergents montrent que la réduction du champ visuel périphérique produit une « compression » des tailles perçues des objets et de leur distance à l'observateur (Hagen *et al.*, 1978). Inversement, lorsqu'un sujet bénéficie d'un élargissement de son champ visuel fonctionnel on observe une amélioration de la performance de pilotage d'un mobile en environnement virtuel (Péruch & Mestre, 1999). On pourrait donc penser que plus on se rapproche de la taille d'un champ visuel « naturel », meilleure va être la performance de l'opérateur, notamment dans des tâches de contrôle de la trajectoire de véhicules.

Cependant, le problème semble complexifié par le fait que, lorsque la taille du champ visuel est supérieure à 120 degrés, les sensations devection (sensation de déplacement de soi visuellement induite) s'accompagnent parfois de troubles neurovégétatifs (Pausch *et al.*, 1993). Les malaises peuvent être attribués à des délais et discordances visuo-vestibulaires liés aux limitations temporelles décrites aux paragraphes précédents. L'hypothèse est aussi avancée que de grands champs de vision produisent ces malaises en même temps qu'ils renforcent le réalisme de la visualisation (So, 1994). Il semble donc qu'une adéquation doive être recherchée entre le besoin d'un champ de vision suffisamment large pour permettre une bonne appréhension de l'environnement et les problèmes posés par un champ de vision trop large et trop « immersif » qui semble de nature à désorienter l'observateur.

En définitive, ces études tirées de la psychologie expérimentale, permettent de définir un champ d'investigation des comportements humains utiles à la conception d'une Coopération Homme-Machine (CHM) propre à la téléopération. D'une manière générale, l'ensemble de ces travaux met en évidence que la contrainte sensori-motrice majeure à

laquelle est soumise un téléopérateur provient des limitations visuo-temporelles et visuo-spatiales des feed-back qui lui sont renvoyés par le système. Or, un individu présente, toutes proportions gardées, les mêmes limitations physiologiques d'ordre spatio-temporel que celles soulignées au niveau du système mécanique. De ce fait, il élabore des stratégies sensori-motrices afin de les compenser. Raison pour laquelle, selon notre démarche bionique, ce sont ces stratégies « naturelles » que nous allons étudier et tenter de modéliser afin d'optimiser la Coopération Homme-Machine.

II – L'anticipation visuo-motrice comme solution comportementale.

Au cours de l'évolution, l'apparition de la vision fovéale s'est accompagnée de la migration des yeux d'une position latérale à une position frontale, ce qui aurait permis, en particulier, la mesure de la distance des objets en profondeur, l'apparition de la poursuite oculaire visuellement guidée... Mais ces avantages de la vision frontale ont eu pour inconvénient que les animaux (et l'homme) ont alors perdu la vision panoramique et qu'il leur fut nécessaire de reconstruire l'environnement visuel à partir d'une succession de vues « locales ». L'orientation du regard n'a donc plus été utilisée uniquement pour orienter le corps, mais pour explorer le monde visuel.

De plus, il est important de faire la distinction entre deux types de mouvements oculaires exploratoires. Le premier type de mouvement correspond à une exploration libre (Harris, 1989), où l'œil est guidé par la saillance de l'environnement. Le second correspond à une exploration visuelle de l'environnement, destinée à permettre la réalisation d'une action précise (Stark & Ellis, 1981). La direction du regard est alors guidée par une imagerie mentale propre à la tâche.

Pour ce qui concerne notre application en CHM, il apparaît clairement que le premier type de mouvements du regard ne se prête pas véritablement à une implémentation robotique, principalement à cause des trop grandes différences stratégiques inter-individuelles. En revanche le second, rendant compte d'un pattern davantage stéréotypé d'un individu à l'autre, apparaît modélisable à des fins d'utilisation au cours d'opérations de télé-guidage.

Lorsqu'un individu est impliqué dans la réalisation d'une tâche précise, il parvient rapidement à anticiper sur les actions à venir, ce qui lui permet d'augmenter son efficacité. En fait, le cerveau s'est construit au cours de l'évolution de manière à anticiper systématiquement sur les actions futures. Se déplacer pour échapper à un prédateur ou chasser une proie,

nécessite d'émettre des hypothèses sur le monde afin de deviner les intentions d'autrui. Ainsi, il ne s'agit pas de simples réflexes, de réponses passives à des stimuli sensoriels, mais au contraire, le contrôle de l'action nécessite que le cerveau soit un prédicteur qui simule les actions de l'autre comme de soi-même. Par exemple, lors d'un mouvement de capture d'une balle, les enregistrements neurophysiologiques montrent que le cerveau n'attend jamais que les sens soient activés pour produire un début de réponse. Dans cette situation, le cerveau va par exemple produire une contraction des muscles 300 ms avant que l'objet ne touche la main (Lacquaniti & Maioli, 1987).

Sur le plan visuel, cette stratégie d'anticipation va concerner tout aussi bien des mouvements de préhension que de locomotion. En ce qui concerne la préhension, on peut obtenir un certain nombre d'informations à partir des travaux menés par Land et al. (1999) sur les activités quotidiennes. Tout d'abord, il apparaît que la direction de la vision fovéale est toujours proche de l'objet à manipuler. De ce fait, on n'observe que peu de fixations oculaires non pertinentes. D'une manière générale, le premier objet manipulé est fixé environ 0,56 seconde et le regard est déplacé vers le prochain objet, 0,61 seconde avant que la manipulation du premier ne soit terminée. Sachant que le regard ne s'attarde pas plus de 3,3 secondes sur un objet et réalise sur lui une moyenne de 7 fixations oculaires.

Sur l'ensemble des fixations oculaires, environ un tiers sert à une de ces quatre fonctions (les autres servant à suppléer ces fonctions) :

- *Localiser* l'objet à utiliser ultérieurement.
- *Diriger* sa main ou l'objet présent dans sa main vers la nouvelle localisation.
- *Guider* l'approche d'un objet vers un autre.
- *Vérifier* l'état de quelques variables de l'environnement.

Ainsi, on remarque que chaque étape de nos activités quotidiennes, y compris les plus inconscientes et automatiques, est systématiquement supervisée par notre regard. Celui-ci ayant tendance à anticiper les activités motrices, comme si les mouvements oculaires représentaient un signal prédictif sur les actions à venir. Ces résultats sous-tendent l'existence d'un « script » mental qui guide la réalisation de nos actions. Ces dernières sont alors définies par un but global, qui se subdivise en plusieurs sous-buts, dont le premier est représenté par les fixations oculaires prédictives.

De même, lors du contrôle du déplacement locomoteur l'axe du regard va anticiper systématiquement sur la trajectoire réalisée. Il a été mis en évidence, que lors de son déplacement, l'individu ne conserve pas son axe céphalique rigoureusement aligné avec le

reste du corps. En effet, il apparaît que pour des trajectoires courbes, l'orientation de la tête du sujet est déviée dans la direction de la marche, vers la concavité de la trajectoire. Plus précisément, la direction de la tête, ou plutôt du regard, guiderait le déplacement en anticipant systématiquement les changements de direction de la locomotion d'un intervalle d'environ 200 millisecondes (Grasso *et al.*, 1996). Cet intervalle d'anticipation est en fait dépendant du degré de courbure de la trajectoire. Il peut atteindre une valeur d'une seconde pour un virage à angle droit.

Il en va de même pour le contournement d'un obstacle. Les enregistrements des mouvements du regard et du corps montrent que le regard pointe en direction de l'obstacle bien avant que l'individu ne se trouve à son niveau, le réalignement de la tête dans la direction de la marche ne s'effectuant qu'après son franchissement (Grasso *et al.*, 1998). Ceci suggère que l'orientation du regard est contrôlée pas à pas selon un mécanisme prédictif de la nouvelle direction à emprunter (Patla *et al.*, 1991). Une stratégie de type « je vais là où je regarde » et non pas « je regarde là où je vais », semble sous-tendre ce guidage de la trajectoire de déplacement.

De telles observations ont aussi été recueillies pour la conduite automobile. Dans ces conditions, on constate un déplacement de l'axe du regard du conducteur une à deux secondes avant d'atteindre la convexité de la courbe. De plus, on remarque, malgré le décalage temporel, une déviation angulaire des roues identique à celle du regard (Land & Lee, 1994). Par cette stratégie l'automobiliste cherche à utiliser les propriétés optiques particulières de la tangente au virage pour guider son véhicule, tout comme le marcheur utilise des repères physiques stables, tel qu'un obstacle, pour contrôler le déplacement de son corps. Des études psychophysiques montrent que cette stratégie de fixation correspond aussi à une optimisation de la prise d'information utile pour le contrôle de la trajectoire (Mestre, 2001).

Ce comportement d'anticipation visuelle sur le déplacement apparaît donc, comme une formidable stratégie que la nature a mise au point pour pallier aux limitations spatio-temporelles inhérentes au système visuo-moteur des animaux supérieurs. Comme il a été présenté dans la section précédente, notre système robotique présentant des limitations identiques, nous avons cherché à implémenter sur le robot mobile de téléopération ce même type de comportement. Le résultat escompté était une amélioration de la rapidité et de la régularité des trajectoires du robot, à l'instar de la locomotion humaine appuyée par les propriétés prédictives du cerveau.

Pour cela, une analogie a été effectuée entre le regard humain et la caméra mobile qui équipe le robot. Au vu de l'architecture fonctionnelle de notre système (sur laquelle on reviendra plus en détail dans la section suivante), il s'offre deux possibilités d'implémenter une anticipation visuelle sur le déplacement : soit (i) par automatisation du mouvement anticipatoire de la caméra en fonction des commandes de navigation que l'opérateur envoie au robot soit, inversement, (ii) par automatisation de la navigation du robot à partir des commandes que l'opérateur envoie à la caméra. Par évaluation expérimentale de ces modes de commande, cette étude va chercher à identifier l'interfaçage offrant la meilleure compatibilité homme-machine pour une tâche de conduite à distance d'un engin mobile. En effet, la question centrale est de savoir, à partir des deux sens de couplage caméra-base mobile, si l'opérateur doit commander la caméra qui contrôle la base mobile, ou bien si l'opérateur doit commander la base mobile qui contrôle la caméra. Enfin, l'ensemble de ces résultats sera discuté au regard des systèmes de Coopération Homme-Machine privilégiant une approche non-automatisée.

Les hypothèses de notre travail expérimental étaient donc les suivantes. Premièrement, une situation dans laquelle la caméra est mobile et pointe vers la trajectoire future de l'engin téléopéré devrait conduire à de meilleures performances (en termes de contrôle de la trajectoire) qu'une situation dans laquelle la caméra est fixe et pointe toujours dans l'axe de l'engin. Deuxièmement, par analogie avec les travaux évoqués ci-dessus, une situation dans laquelle la caméra « anticipe » temporellement les changements d'orientation de l'engin devrait aussi conduire à une meilleure performance. C'est donc dans la situation où l'opérateur contrôle la caméra, qui elle-même commande la « motricité » de l'engin, que le contrôle de la trajectoire devrait être optimisé.

III – Matériel expérimental : le système télérobotique ARPH.

ARPH (Assistance Robotique pour Personnes Handicapées) est un système télérobotique d'assistance aux personnes handicapées. Il vise à pallier, au moins partiellement, des incapacités de déplacement et de saisie pour une personne handicapée physique. Il est constitué d'une base mobile portant un bras manipulateur. La base mobile est mue par deux roues motrices indépendantes, une roue folle à l'avant stabilisant le véhicule. Les moteurs choisis, largement utilisés pour les fauteuils roulants électriques dans un souci d'homogénéisation avec le matériel existant, sont inclus dans le système DX. Il s'agit d'un réseau sur lequel l'ensemble des équipements est branché de telle sorte qu'ils soient

commandables par une seule interface, classiquement un joystick. Un point d'entrée sur ce réseau existe par l'intermédiaire de la liaison parallèle d'un PC : le DXKEY.

Le robot est également équipé d'une caméra orientable en site et en azimut par l'intermédiaire d'une liaison série. Son champ optique horizontal est de 50 degrés et son champ vertical de 38 degrés. Ce capteur permet de retourner à l'opérateur une image de l'environnement dans lequel le robot évolue, sur un terminal de visualisation de 31 sur 23 cm. L'ensemble du système, moteurs et capteur, est piloté par un PC embarqué sur le robot. Ce dernier est relié à un PC de commande par l'intermédiaire d'une liaison TCP/IP HF. Une architecture client/serveurs structure la partie informatique (Figure 1). Les serveurs sont écrits en langage C, le client en Java. Dans la présente expérimentation, deux modes de Coopération Homme-Machine biomimétiques ont été développés : le modèle d'anticipation sur le déplacement par commande de la base mobile versus le modèle par commande de la caméra.

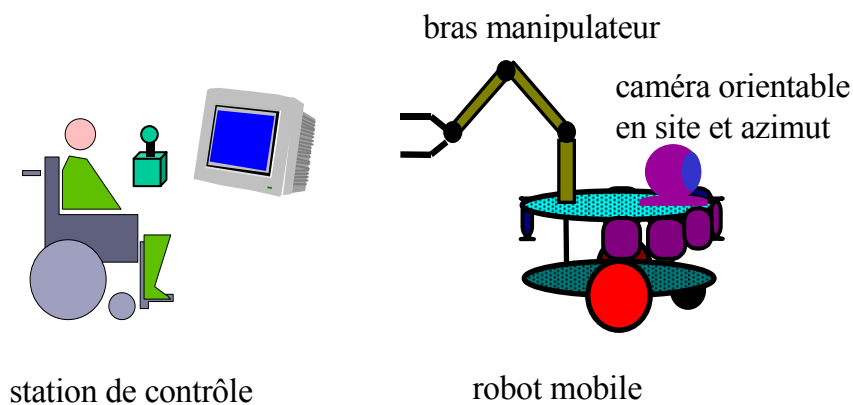


Figure 1 : Le système ARPH.

Modèle « base mobile ». Dans cette situation, l'opérateur ne contrôle qu'indirectement l'orientation de la caméra, en fonction de la commande de navigation directe qu'il envoie au robot. Ainsi, la personne n'aura qu'une maîtrise relative sur la direction de son regard, celui-ci ne s'orientant que de manière réflexe suivant la commande locomotrice. A partir de l'analogie réalisée entre l'œil humain et la caméra mobile du robot, le mouvement de cette dernière a été automatisé de manière à ce qu'elle s'oriente toujours en direction du point de tangente à la trajectoire interne de déplacement, c'est à dire à l'endroit même où les travaux neuroscientifiques montrent que l'information visuelle est la plus pertinente pour guider la locomotion. C'est ce qui est illustré par la Figure 2 qui représente une vue de dessus schématique de la base mobile se déplaçant suivant le « modèle base mobile ».

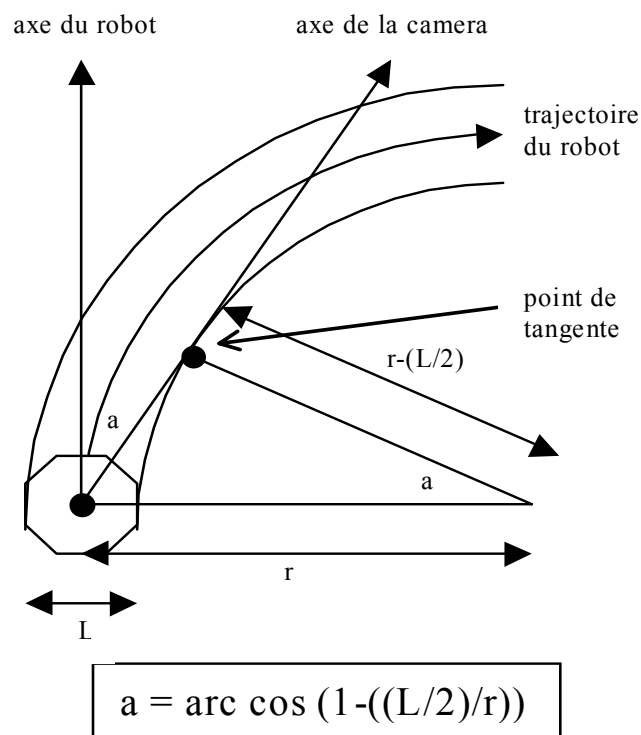
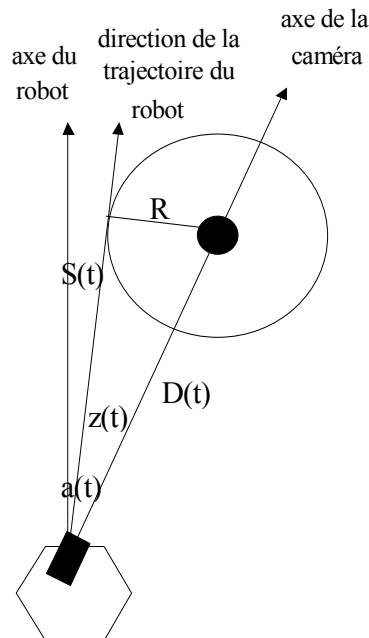


Figure 2 : Principe de la modélisation « base mobile ».

Dans notre architecture robotique, l'angle de navigation du robot est commandé en vitesse par l'opérateur. Ainsi, le système informatique peut calculer en ligne le rayon de courbure (r) de la trajectoire du robot, à partir du rapport de la vitesse linéaire (v) sur la vitesse angulaire (w) de déplacement. Par la suite, l'angle de direction de la caméra (a) est obtenu à partir de ce rayon de courbure (r) et en utilisant les propriétés trigonométriques. Ici, $\cos a = (r - (L/2))/r$, où $L/2$ correspond à la demi-largeur du robot. D'où la modification automatique d'orientation de la caméra suivant l'équation : $a = \arccos (1 - ((L/2)/r))$.

Modèle « caméra ». Cette seconde modélisation de l'anticipation visuelle est construite suivant un raisonnement inverse au modèle précédent. Ici, c'est l'axe d'orientation de la vision qui va déterminer la trajectoire du mobile. L'opérateur va contrôler directement les mouvements de caméra, alors que l'angle de navigation du robot ne sera inféré qu'à partir de la direction de celle-ci. Ainsi, à l'inverse du modèle « base mobile », la vision est maintenant activement contrôlée par l'Homme et le déplacement du robot est automatisé. En pratique, le modèle est inspiré du comportement d'anticipation visuelle qui consiste à fixer un repère et le conserver dans son champ visuel, afin de décrire une trajectoire idéale autour de

lui (Land & Lee, 1994 ; Murray *et al.*, 1997). Le grand avantage de cette situation est qu'elle permet à l'opérateur de visualiser continuellement l'obstacle le plus proche du robot, limitant ainsi les risques de collisions. La Figure 3 schématise, vue d'en haut, la représentation géométrique de ce contournement d'obstacle par le robot.



$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{a}(t) - \text{arc sin} (\mathbf{R} / \mathbf{D}(t))$$

Figure 3 : Principe de la modélisation « caméra ».

Selon ce modèle, si l'opérateur pointe la caméra toujours en direction de l'obstacle, le véhicule doit le contourner en respectant une orbite de sécurité R. L'angle de navigation du robot (S) est défini par la différence entre l'angle (a), compris entre l'axe de la caméra et l'axe avant du robot, et l'angle (z), entre l'axe de la caméra et un axe imaginaire tangent à l'orbite de sécurité. Cet angle z est obtenu par relations trigonométriques de telle manière que $\sin z(t) = R/D(t)$, où D correspond à la distance entre le robot et l'obstacle. C'est précisément au niveau de la détermination de la valeur D que se traduit le niveau de coopération entre l'Homme et la machine. C'est l'humain qui détermine D à travers son pilotage de la caméra en azimuth. En effet, D est obtenu par la vitesse linéaire (v) du véhicule rapportée au taux de variation d'angle de la caméra (a), tel que $D = (v / (da / dt)) \sin a$. Au final, la trajectoire de la base mobile est recalculée à chaque itération selon la formule suivante : $\mathbf{S}(t) = \mathbf{a}(t) - \text{arc sin} (\mathbf{R} / \mathbf{D}(t))$.

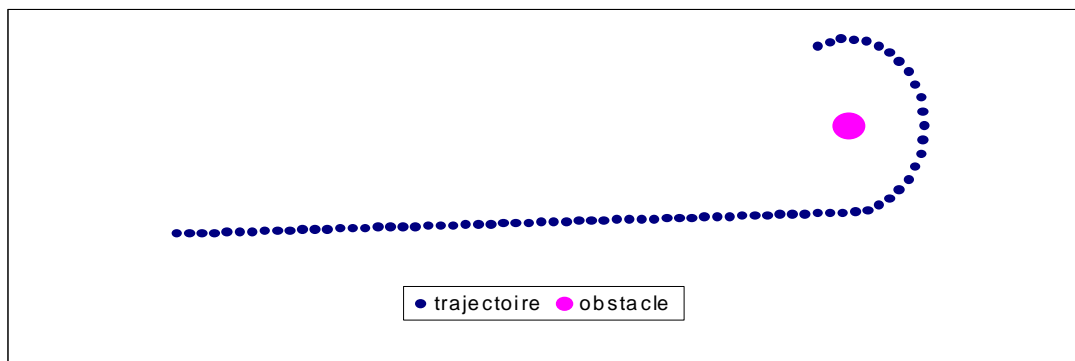


Figure 4 : Simulation d'une trajectoire d'un véhicule équipé du « modèle caméra ».

Les premiers résultats en simulation montrent qu'un véhicule équipé d'une telle équation, semblerait parfaitement capable d'enrouler un obstacle tout en restant à équidistance de lui (Figure 4). Il reste maintenant à tester la validité de cette modélisation en condition réelle, compte tenu du bruit lié à l'interaction avec une entité humaine devant rediriger la caméra d'un obstacle à l'autre du parcours expérimental.

IV – Protocole expérimental.

Sujets. Une population de vingt et un étudiants ou membres du laboratoire âgés entre 25 et 35 ans a participé à l'ensemble des quatre sessions expérimentales. Trois groupes indépendants de sept sujets ont effectué chacun l'une des deux conditions expérimentales. Ils possédaient tous une vision normale ou utilisaient des verres correcteurs leur assurant une bonne vision. Tous étaient naïfs quant au but de l'expérimentation. L'ensemble de l'expérience durait une heure environ pour chaque sujet.

Conditions. Il y avait trois conditions expérimentales différentes de vision. Une condition de vision fixe, pour laquelle la caméra restait immobilisée droit devant dans le sens de marche du robot. Et deux conditions de vision mobile d'anticipation, l'une où la caméra était mobilisée selon le « modèle base mobile » et l'autre où les mouvements de caméra étaient commandés selon le « modèle caméra ».

Procédure. Sur l'ensemble de l'expérience, tous les sujets étaient placés en situation de téléopération, c.a.d qu'ils n'avaient qu'une vision indirecte, via un terminal de

visualisation, de l'environnement où évoluait le robot. Dans un premier temps, les sujets effectuaient une période d'entraînement afin de se familiariser à la situation de téléopération et au mode de commande du robot. Suivant la condition expérimentale, cette première phase leur permettait également d'apprécier les avantages et les limites de leur angle de vue. L'entraînement était interrompu lorsque le sujet (i) se sentait à l'aise, (ii) était capable de combiner translation et rotation de véhicule pour réaliser des trajectoires curvilinéaires, et (iii) qu'il limitait son nombre de collisions avec les obstacles. L'ensemble des sujets est rapidement parvenu à remplir ces critères d'apprentissage.

Dans un deuxième temps, les sujets étaient confrontés à la phase de test. Leur tâche consistait à faire exécuter au robot un parcours de slalom entre quatre balises (Figures 8 et 9). Celles-ci étaient organisées de telle manière que le robot devait effectuer plusieurs types de virages compris entre 20 et 360 degrés. Ce trajet était effectué une fois dans un sens et une fois dans le sens opposé d'une session à l'autre, afin d'éviter que l'opérateur ne développe trop facilement une stratégie de navigation stéréotypée. La consigne donnée au sujet était de réaliser le parcours le plus rapidement possible tout en évitant les collisions. Sur chacune des sessions, la performance a été évaluée à partir du temps d'exécution du trajet, du nombre d'arrêts, du nombre de collisions avec les obstacles et d'un indice permettant d'estimer la régularité des trajectoires.

V – Analyse des résultats.

Temps d'exécution du parcours. Tout d'abord, on observe une diminution significative du temps nécessaire pour effectuer le parcours au cours des sessions ($F [3, 54] = 5.57 ; p < .002$). Cet effet de session montre que les opérateurs poursuivent leur apprentissage, et en particulier au niveau des premières sessions de test (Figure 5).

Mais surtout, les sujets s'avèrent significativement plus rapides en condition de vision mobile (modèle caméra et modèle base mobile) qu'en condition de vision fixe ($F [2, 18] = 7.28 ; p < .005$). En effet, le temps d'exécution du parcours est beaucoup plus court lorsque l'opérateur peut bénéficier d'un angle de caméra qui anticipe sur le déplacement (175 secondes, pour le modèle base mobile ; 154 secondes, pour le modèle caméra) que lorsque celle-ci reste dans une position fixe (254 secondes).

A remarquer que cette différence significative se maintient au cours des sessions ($F [1, 12] = 6.03 ; p < .03$, à la 4^{ème} session), ce qui tendrait à prouver que l'apprentissage à lui seul ne parviendrait pas à combler l'infériorité de la vision fixe par rapport à la vision mobile.

En revanche, il n'y a aucune différence significative entre les deux conditions de vision mobile ($F [1, 12] = 0.28 ; NS$).

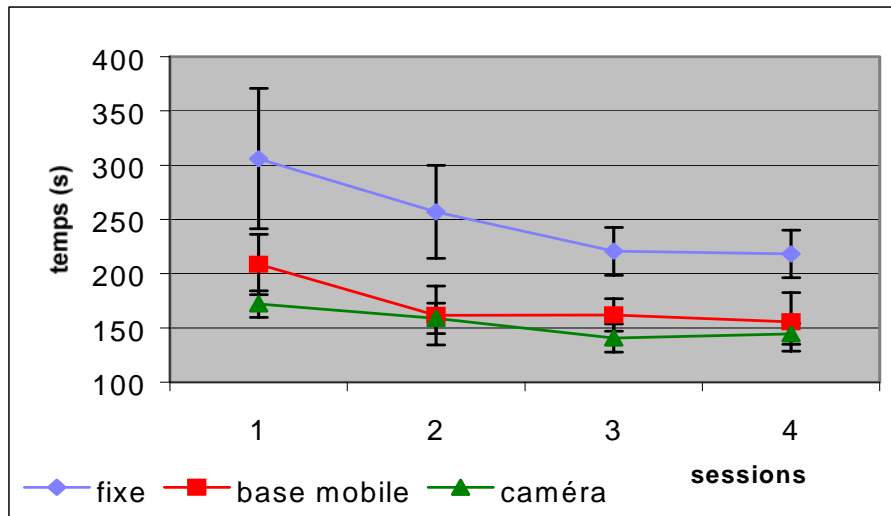


Figure 5 : Temps moyen d'exécution du parcours pour les 3 conditions au fil des sessions.

Nombre d'arrêts. A la différence du paramètre précédent, malgré la présence d'une tendance générale de diminution de la quantité d'arrêts au cours des sessions, en particulier entre la première et la deuxième session (Figure 6), celle-ci n'apparaît pas comme étant significative ($F [3, 54] = 2.27 ; NS$). Des arguments en terme de surentraînement des sujets avant la phase de test peuvent expliquer cette absence d'effet de session sur le nombre d'arrêts. En effet, une des conditions pour valider la phase d'apprentissage étant que l'opérateur soit capable de combiner translation et rotation, pour réaliser des trajectoires curvilinéaires, a fortement réduit sa propension à stopper le véhicule.

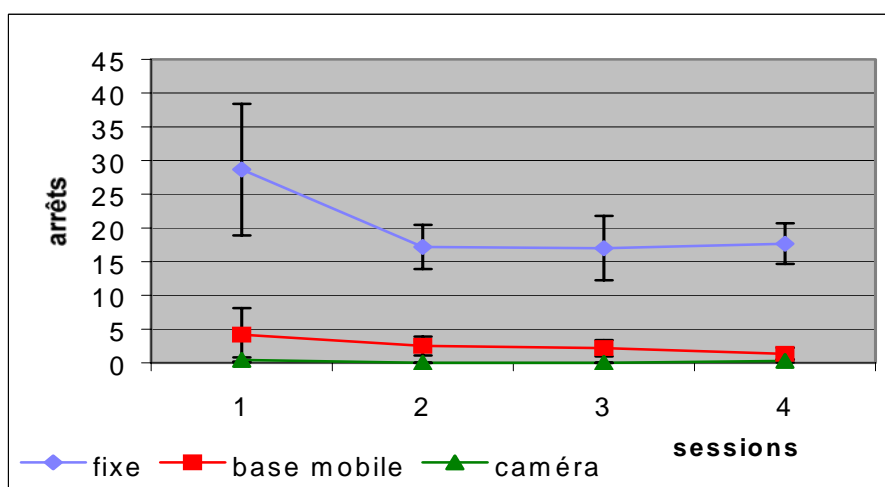


Figure 6 : Nombre moyen d'arrêts pour les 3 conditions au cours des sessions.

En ce qui concerne la comparaison principale, qui oppose les visions mobiles à la vision fixe, on retrouve une différence largement significative en faveur de la condition de vision mobile ($F [2, 18] = 20.78$; $p < .00001$). Ainsi, lorsque la caméra anticipe visuellement sur les courbes à venir l'opérateur parvient d'autant plus facilement à faire effectuer au robot des trajectoires curvilignes, ce qui a pour effet de diminuer drastiquement le nombre d'arrêt du véhicule (le nombre moyen d'arrêts est de : 18.7, pour la condition fixe ; 2.5, pour la condition « base mobile » ; 0.4, pour la condition « caméra »).

Mais surtout il est important de remarquer, une fois de plus, que cette supériorité des visions mobiles au niveau de la régularité temporelle du déplacement résiste de manière significative jusqu'à la dernière session ($F [1, 12] = 26.78$; $p < .0002$), ce qui étaye l'idée de primauté de l'effet de condition sur l'effet d'apprentissage. A noter, aussi, la nette tendance du modèle « caméra » à produire moins d'arrêts que le modèle « base mobile », même si cette dernière ne mène pas à une différence significative ($F [1, 12] = 3.29$; $p < .10$).

Nombre de collisions. Ce paramètre, présentant certains résultats différents par rapport aux analyses précédentes, vient apporter quelques nuances. Premièrement, on ne constate également pas d'effet de session ($F [3, 54] = 0.63$; NS). Ceci s'explique par le fait que la condition de vision fixe et la condition « base mobile » décrivent des patterns de performance opposés au cours des sessions (Figure 7), ce qui aboutit à un effet d'interaction significatif entre ces deux conditions et les sessions ($F [3, 36] = 3.15$; $p < .05$).

Ainsi, le nombre de collisions se réduit avec les sessions, surtout entre la première et la deuxième, pour la condition caméra fixe. Ce résultat indique que l'opérateur utilise des indices appris dans l'environnement pour en inférer la position relative des obstacles par rapport au robot. Au contraire, il y a une légère tendance à une augmentation du nombre de ces collisions au fil des sessions, surtout entre les deux premières, pour la condition vision mobile. Dans cette dernière situation, les individus étant plus rapidement à l'aise que ceux de la condition caméra fixe, ils conduisent plus vite, plus précocement, et augmentent ainsi leurs risques de contact avec l'environnement dès les premières sessions de test. En revanche, le modèle caméra maintient son nombre de collision à un niveau faible tout au long de l'expérience.

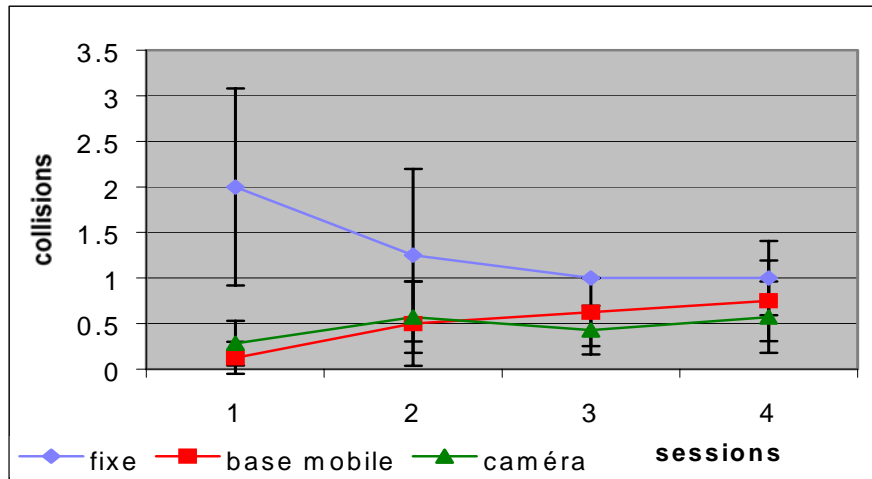


Figure 7 : Nombre moyen de collisions pour les 3 conditions au cours des sessions.

Deuxièmement, le nombre de collisions étant plus faible en conditions de caméra mobile (0.5, pour le modèle base mobile ; 0.4, pour le modèle caméra) qu'en caméra fixe (1.3 contacts) , on observe encore une différence significative sur l'ensemble des trois conditions de vision ($F [2, 18] = 4.10 ; p < .03$). Cependant, il est important de noter que contrairement aux autres paramètres, le nombre de collisions avec les obstacles n'est pas significativement différent entre la condition fixe et la condition « base mobile » ($F [1, 12] = 4.32 ; NS$).

Cela signifie que les indices appris dans l'environnement par le sujet lui suffisent à réaliser une performance d'évitement d'obstacles aussi bonne, que lorsque l'opérateur bénéficie d'un balayage de caméra suivant un modèle « base mobile ». En fait, seul le modèle « caméra » produit significativement moins de collisions que la condition fixe ($F [1, 12] = 5.52 ; p < .04$). De plus, cette différence significative persiste encore à la troisième session expérimentale ($F [1, 12] = 9.82 ; p < .01$), montrant une plus grande régularité dans l'amélioration de la performance globale suivant un modèle de vision mobile « caméra ».

Lissage des trajectoires. Lorsqu'on observe les trajectoires décrites par le robot, on constate que leur caractère segmenté correspond au fait que les phases de changement de direction s'opèrent quand le véhicule est à l'arrêt. Inversement, leur caractère lissé correspond donc à une diminution de ces phases où la vitesse de rotation est élevée alors que la vitesse linéaire est nulle. A ce sujet, on remarque que les opérateurs placés en condition de vision mobile, ayant un nombre d'arrêt réduit, semblent effectuer des trajectoires plus lissées (Figure 8) que ceux du groupe de la vision fixe (Figure 9).

Une manière de quantifier ce lissage est alors de calculer le rayon de courbure instantané de chaque trajectoire, et d'évaluer la distribution fréquentielle de ce rayon au cours de chacune des trajectoires (Péruch & Mestre, 1999). Concrètement, le rayon de courbure (r) est calculé comme le rapport de la vitesse linéaire instantanée (v) sur la vitesse de rotation instantanée (w), selon la formule suivante :

$$r(m) = \frac{v(m/sec)}{w(radians/sec)}$$

Par la suite, le rayon de courbure est converti en logarithme décimal. Ainsi, si le robot a une vitesse linéaire faible et une vitesse de rotation élevée, le rayon de courbure sera très petit (< 1), d'autant plus petit que la vitesse de rotation sera importante. La valeur logarithmique de r sera alors négative. Inversement, si le véhicule avance et tourne en même temps (trajectoire curvilinéaire), le rayon de courbure sera très grand (≥ 1) et son logarithme supérieur ou égal à 0.

Une trajectoire dans laquelle le sujet s'arrête pour prendre les virages donne lieu à une distribution bimodale des rayons de courbure, avec un pic de distribution centré sur des valeurs négatives du logarithme du rayon et un autre pic centré sur des valeurs positives ou nulle de ce logarithme. Au contraire, une trajectoire essentiellement curvilinéaire correspond à une distribution unimodale centrée sur une valeur supérieure ou égale à 0 du logarithme de rayon de courbure.

Pour chaque trajectoire, la distribution du logarithme de rayon de courbure a été calculée et répartie en quinze catégories. Les distributions ont été normalisées, en exprimant les occurrences de rayon de courbure dans chaque catégorie comme un pourcentage du nombre total d'occurrences pour chaque trajectoire.

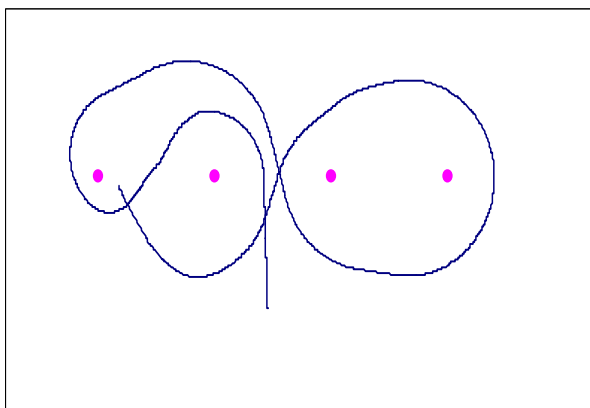


Figure 8 : Exemple de trajectoire lissée.

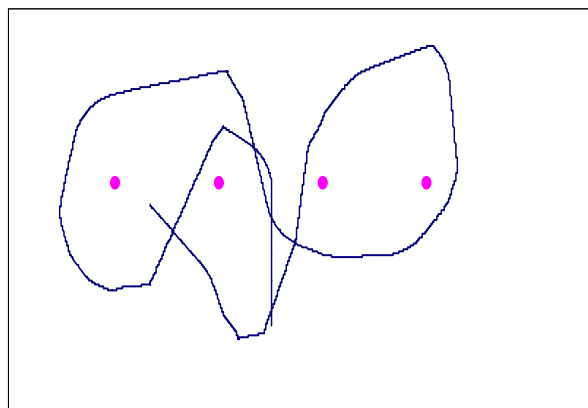


Figure 9 : Exemple de trajectoire segmentée.

Les premiers résultats montrent un effet significatif du facteur catégorie ($F [14, 252] = 215.63$; $p < .00001$), indiquant que la distribution des rayons de courbure n'est pas monotone. On observe, en effet, deux pics principaux (Figure 10). Un grand pic centré sur des valeurs du logarithme du rayon de courbure égales à 0, correspondant à des valeurs de rayons de courbure aux alentours de 1 mètre (catégorie 9, sur les figures). Ce pic correspond à des trajectoires curvilinéaires, dont le rayon de courbure est lié aux caractéristiques de l'espace expérimental ainsi qu'aux propriétés dynamiques du véhicule utilisé. Un deuxième pic de distribution se situe dans les valeurs négatives (catégories 4 et 5, sur les figures). Il correspond à des situations dans lesquelles le sujet exécute une rotation avec une vitesse linéaire faible, voire nulle, afin de faire prendre les virages au robot. On note également une légère montée pour des valeurs de logarithme très élevées (catégories 11 et 12), pour lesquelles il ne s'agit plus de courbes mais de lignes droites, à l'échelle du véhicule, raison pour laquelle ces données n'ont pas été soumises à plus d'analyses.

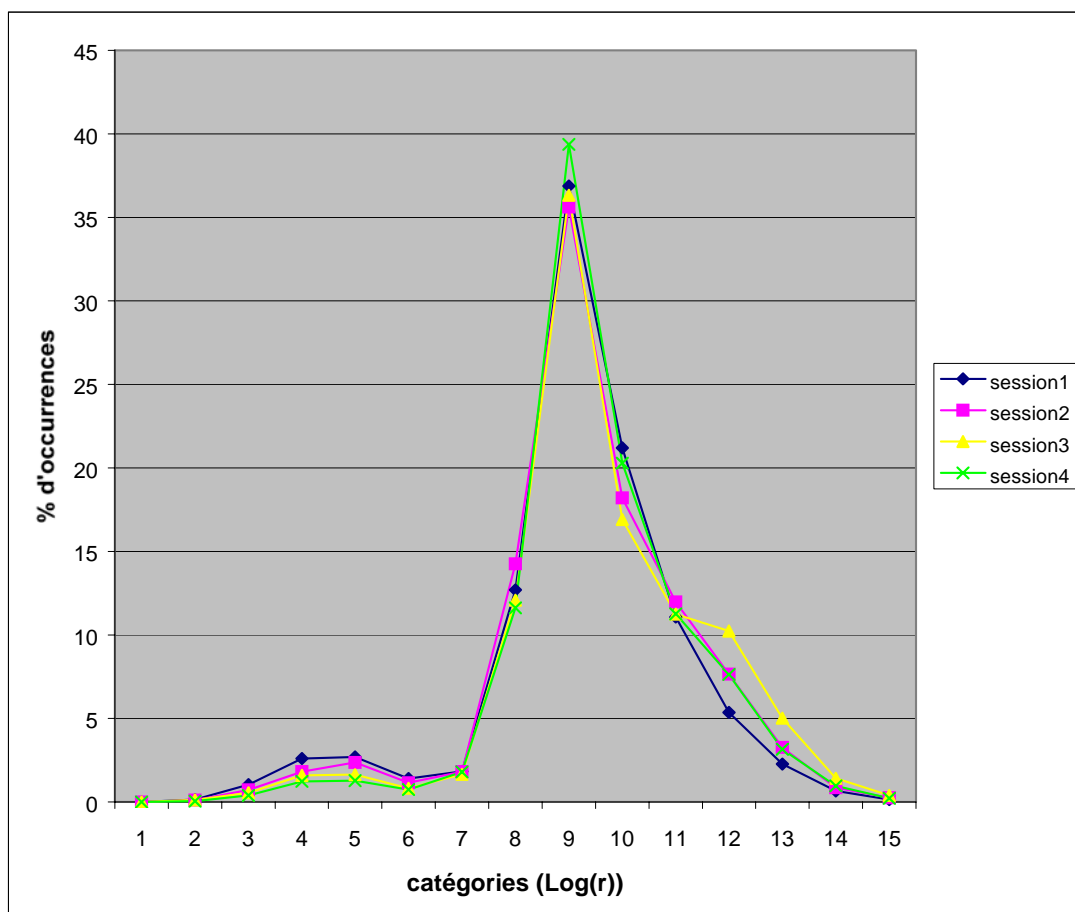


Figure 10 : Distribution moyenne des (logarithmes des) rayons de courbure, exprimée en pourcentage du nombre total d'occurrences, en fonction des sessions expérimentales.

Deuxièmement, il y a un effet significatif de session ($F [3, 54] = 340.60 ; p < .00001$), ainsi que d'interaction entre le facteur catégorie et le facteur session ($F [42, 756] = 1.91 ; p < .0006$). Au cours des sessions, les catégories 4 et 5 passent de 3% à 1% d'occurrence, pendant que la catégorie 9 passe de 35% à 39% d'occurrences. Ces deux premiers effets massifs signifient qu'au fil de l'apprentissage (de la session 1 à la session 4, voir Figure 10), le sujet tourne de moins en moins sur place (le pic de distribution des catégories 4 et 5 s'effondre) alors que la curvilinéarité de la trajectoire s'accroît (le pic de distribution de la catégorie 9 s'élève). On peut donc en déduire que l'apprentissage de la tâche conduit à un lissage des trajectoires.

Troisièmement, on observe également un effet d'interaction significatif entre la condition de vision et le facteur catégorie ($F [28, 252] = 21.28 ; p < .00001$). En effet, la Figure 11 montre que le pourcentage d'occurrences des petits et grands rayons de courbure n'est pas le même selon la condition visuelle. Le grand pic, correspondant aux trajectoires curvilinéaires, est significativement plus élevé en visions mobiles qu'en vision fixe ($F [2, 18] = 28.61 ; p < .00001$). Inversement, le petit pic, correspondant aux rotations sur place, est significativement plus bas en visions mobiles qu'en vision fixe ($F [2, 18] = 13.35 ; p < .0003$). De plus, il est à noter, que ces différences significatives entre les conditions sont préservées jusqu'à l'ultime session aussi bien pour les trajectoires curvilinéaires ($F [2, 18] = 14.30 ; p < .0002$) que pour les rotations sur place ($F [2, 18] = 16.98 ; p < .0001$). Cela signifie que l'anticipation visuelle apportée par une vision mobile assure une plus grande fluidité dans l'enchaînement des virages, que même un apprentissage en vision fixe ne peut égaler.

Enfin, lorsqu'on compare les deux modèles de vision mobile entre eux, on constate également un effet d'interaction entre le facteur catégorie et la condition de vision ($F [14, 168] = 19.88 ; p < .00001$). En effet, on remarque toujours sur la Figure 11, que la répartition entre les grands et les petits rayons de courbure n'est pas la même suivant le modèle « base mobile » ou le modèle « caméra ». Ainsi, le grand pic est significativement plus élevé en condition « caméra » qu'en condition « base mobile » ($F [1, 12] = 21.10 ; p < .0006$), cette différence se maintenant significative jusqu'à l'avant dernière session expérimentale ($F [1, 12] = 36.88 ; p < .0001$). Alors que les rotations sur place sont significativement plus nombreuses en condition « base mobile » que « caméra » ($F [1, 12] = 5.63 ; p < .04$). Cette ultime différence massive entre les deux conditions de vision mobile, associée à celle du paramètre du nombre de collisions, tend à prouver qu'un contrôle de

l'anticipation visuelle sur le déplacement suivant un interfaçage par commande directe de la caméra assure une meilleure compatibilité Homme-Machine.

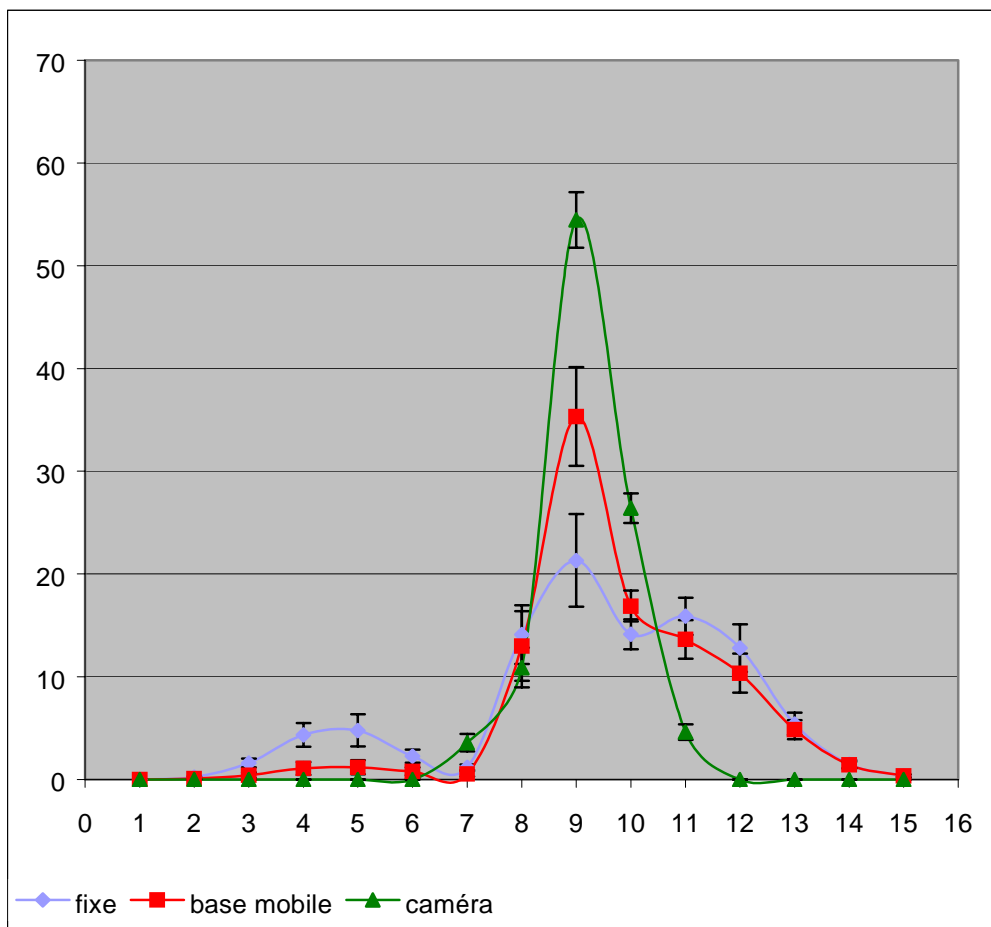


Figure 11 : Distribution moyenne des (logarithmes des) rayons de courbure, exprimée en pourcentage du nombre total d'occurrences, en fonction des 3 conditions de vision.

V – Discussion.

Cette expérience a visé à étudier les conséquences de l'implémentation du comportement humain d'anticipation visuelle, suivant deux modèles de couplage vision-locomotion, sur la performance de navigation. Pour cela, deux conditions de vision mobile (le modèle « base mobile » versus le modèle « caméra ») ont été comparées à une condition de vision fixe au cours de quatre sessions expérimentales successives. Une tendance générale a été observée quant à l'amélioration de la performance au fil des sessions (principalement entre les deux premières sessions), même si celle-ci ne s'est avérée statistiquement significative qu'au niveau du paramètre temporel et de l'indice de lissage des trajectoires. Ce premier résultat

témoigne donc d'une intégration relativement rapide, de la part du sujet, des propriétés dynamiques du véhicule téléopéré.

Mais le résultat majeur de cette expérience est de révéler une différence significative, sur la totalité des paramètres analysés (temps de parcours, nombre d'arrêts, nombre de collisions et lissage des trajectoires), entre les conditions de vision. Ainsi, un téléopérateur qui bénéficie d'une caméra mobile va voir fortement diminuer son temps de déplacement, ses phases d'immobilisation, ses contacts contre l'environnement expérimental et va présenter des trajectoires beaucoup moins segmentées. Les raisons de cet avantage proviennent de la possibilité d'anticipation visuelle sur l'angle de navigation, couplée à une augmentation du champ visuel fonctionnel, confirmant de ce fait l'importance de la vision périphérique (Johansson & Börjesson, 1989 ; Warren *et al.*, 1991). Du reste, il est à noter que, malgré une amélioration de la performance au cours des sessions d'autant plus marquée dans la condition vision fixe, cet effet d'apprentissage ne parvient pas à égaler la supériorité naturelle du comportement anticipatoire. Ainsi, on comprend pourquoi cette stratégie a été mise en place et conservée au cours de l'évolution (Berthoz, 1997), afin d'optimiser les mouvements de préhension (Land *et al.*, 1999), de locomotion (Grasso *et al.*, 1996) ou de conduite automobile (Land & Lee, 1994).

Cette persistance, au fil des sessions, du bénéfice d'une vision mobile sur une vision fixe va à l'encontre des résultats de Péruch et Mestre (1999), pour lesquelles la supériorité de la vision mobile n'apparaissait qu'aux premières sessions. Aussi, leur condition expérimentale se différençait, entre autres aspects méthodologiques, de la nôtre par le fait que le sujet se trouvait dans un mode de contrôle du véhicule entièrement non-automatisé, autant au niveau de la commande locomotrice que de la commande visuelle. Ainsi, la limitation de performance causée par l'élévation de la charge de travail mental d'une telle situation contribue à ce qu'une simple vision solidaire de sa base parvienne à des niveaux de performance comparable, grâce à l'acquisition d'indices appris au fil des sessions.

Au contraire, dans la conception de notre système de Coopération Homme-Machine nous avons obéi à un principe de commande robotique dit partagé. Dans ce modèle de coopération les opérations de haut niveau cognitif sont réalisées par l'Homme et celles de bas niveau cognitif par la machine, limitant ainsi les risques de surcharge mentale. Le réflexe d'anticipation visuelle sur le mouvement relevant de ce bas niveau, il a pu être facilement implémentable sur le robot et efficacement utilisable dans le cadre d'un mode de commande semi-automatique.

Ceci dit, il semble qu'entre les deux modèles d'anticipation visuelle sur le mouvement l'un paraisse encore plus efficace que l'autre. Pour le paramètre du nombre de collisions par exemple, seul le modèle où l'opérateur a un contrôle direct sur la vision (modèle « caméra ») fournit une performance significativement plus élevée que la condition de vision fixe. De même, si le pilotage d'un mobile équipé du modèle « base mobile » est significativement moins saccadé que celui d'un mobile à caméra fixe, de tels véhicules permettent un pilotage bien moins fluide que suivant un modèle « caméra ». Cette différence entre les deux modèles de vision mobile, tend à montrer qu'il est plus favorable à un opérateur d'avoir un contrôle direct sur la direction de son axe visuel afin de contourner l'obstacle pointé par la caméra, plutôt que cette direction soit inférée à partir d'un contrôle direct de la navigation entraînant ainsi un pilotage davantage heurté.

Une interprétation en terme neuroscientifique peut expliquer cette supériorité du couplage regard-locomotion dans le sens caméra vers base mobile. En effet, on sait que lors de l'exécution du mouvement en situation naturelle, la fovéalisation de la cible tout au long du déroulement de l'action entraîne une optimisation des ajustements moteurs se traduisant par une réduction de la variabilité spatiale des trajectoires (Prablanc *et al.*, 1986). Ainsi, la tête, portant les yeux, est utilisée comme une centrale inertielle de guidage qui est stabilisée dans l'espace et à partir de laquelle le mouvement du corps est coordonné. Le fait que le reste du corps se contente de suivre la direction indiquée par l'orientation volontaire du regard est une explication sur la plus grande compatibilité Homme-Machine observée dans le modèle « caméra », les études ergonomiques montrant que les modes de commande semi-automatiques les plus efficaces sont ceux où le contrôle de haut niveau est laissé à la volonté de l'opérateur humain (Endsley & Kaber, 1999 ; Parasuraman *et al.*, 2000).

En conclusion, l'ensemble de ce travail présente deux intérêts majeurs, l'un sur le plan de l'ingénierie l'autre sur celui des neurosciences. Du point de vue de la conception technique cette étude montre l'avantage d'entreprendre une approche bionique pour la réalisation d'un robot mobile téléopéré par une personne humaine. Ainsi, l'implémentation du comportement humain d'anticipation visuelle sur le mouvement dans le mode de fonctionnement du robot a permis de réduire l'écart fonctionnel existant entre l'Homme et la machine, source principale des difficultés rencontrées par un téléopérateur. De plus, et c'est là l'apport principal pour les neurosciences, on constate que plus l'interfaçage de contrôle du mobile est fidèle au comportement humain, plus grande est la compatibilité Homme-Machine. En cela, nos résultats militent davantage en faveur d'une interprétation de l'organisation temporelle de la commande motrice des mouvements depuis la tête jusqu'aux pieds (Patla *et al.*, 1991), plutôt

qu'en terme de commande simultanée sur l'ensemble du système nerveux, où seule la différence d'inertie entre les segments corporels permet un déplacement précoce de la tête (Biguer *et al.*, 1982).

Bibliographie

AAP – Antroform Arm Project. <http://rca.ee.washington.edu/BRL/project/aarm/>.

Bar-Cohen, Y. (2002). Biologically inspired robots as artificial inspectors. *SPIE Smart Structures and Materials Symposium*. 18-20 March, San Diego.

Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob Sciences.

Biguer, B., Jeannerod, M., & Prablanc, C. (1982). The coordination of eye, head, and arm movements during reaching at a single visual target. *Experimental Brain Research*, 46, 301-304.

Coello, Y., & Grealy, M.A. (1997). Effect of size and frame of visual field on the accuracy of an aiming movement. *Perception*, 26, 287-300.

Cornilleau-Pérèse, V., & Gielen, C.C.A.M. (1996). Interactions between self-motion and depth perception in the processing of optic flow. *Trends in Neurosciences*, 19, 196-202.

Endsley, M.R., & Kaber, D.B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in dynamic control task. *Ergonomics*, 42, 462-492.

Gauthier G.M., & Beaubaton, D. (1987). Définition du mode optimal de commande d'un syntaxeur bi-manuel homomorphe pour l'apprentissage des tâches de manipulation d'un robot anthropomorphe. *Proposition d'étude au PIRITTEM*.

Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA : 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.

Grasso, R., Prévost, P., Ivanenko, Y.P., & Berthoz, A. (1998). Eye-head coordination for the steering of locomotion in humans : An anticipatory synergy. *Neuroscience Letters*, 253, 115-118.

Gray Sue, V., & Wilson, J.R. (1988). User safety requirements for robot safety, a task analysis approach. *10th Ergonomics International Association Symposium*. 1-5 August, Sydney.

Grimbergen, K.A. (1997). Minimally invasive surgery : Human-machine aspects and engineering approaches. In T.B. Sheridan & T. Van Lunteren (Eds.). *Perspectives on the*

- human controller. Essays in honor of Henk, G. Stassen*, 223-231. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, INC, Publishers.
- Hagen, M.A., Jones, R.K., & Reed, E.S. (1978). On a neglected variable in theories of pictorial perception : truncation of visual field. *Perception & Psychophysics*, 23, 326-330.
- Harris, C.M. (1989). The ethology of saccades : A non-cognitive model. *Biological Cybernetics*, 60, 401-410.
- Held, R., & Durlach, N. (1993). Telepresence, time delay and adaptation. In S.R. Ellis, M.K. Kaiser & A.J. Grunwald (Eds.). *Pictorial communication in virtual and real environments*. New York : Taylor and Francis.
- Hightower, J.D., Spain, E.H., & Bowles, R.W. (1987). Telepresence : A hybrid approach to high-performance robots. *Third International Conference on Advanced Robotics (ICAR'87)*.
- Johansson, G., & Börjesson, E. (1989). Toward a new theory of vision studies in wide-angle space perception. *Ecological Psychology*, 1, 301-331.
- Kazerooni, H. (1989). Theory and experiments on human-robot interaction via transfer of power and information signals. *IEEE Conference on Robotics and Automation*. Scottsdale, Arizona.
- Lacquaniti, F., Maioli, C. (1987). Anticipatory and reflex coactivation of antagonist muscles in catching. *Brain Research*, 406, 373-378.
- Land, M.F., Mennie, N., & Rusted, J. (1999). The roles of vision and eye movements in the control of activities of daily living. *Perception*, 28, 1311-1328.
- Land, M.F., Lee, D.N. (1994). Where we look when we steer ? *Nature*, 369, 742-744.
- Leibowitz, H.W. (1986). Recent advances in our understanding of peripheral vision and some implications. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 23, 183-193.
- Lui, A., Tharp, G., French, L., Lai, S. & Stark, L. (1993). Some of what one needs to know about head-mounted displays to improve teleoperator performance. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 9, 638-648.
- MacFarlane, M. P., Rosen, J., Hanaford, B., Pellegrini, C., & Sinanan, M.N. (1999). Force-feedback grasper helps restore scenes of touch in minimally invasive surgery. *Journal of Gastrointestinal Surgery*, 3, 278-285.
- Massimo, M., & Sheridan, T. (1989). Variable force and visual feedback effects and teleoperator man/machine performance. *Nasa Conference on Space Telerobotics*. Pasadena.

- Mestre, D. (2001). Dynamic evaluation of the functional visual field in driving. *Proceedings of Driving Assessment 2001*, Aspen, Colorado, 234-239.
- Mestre, D., & Péruch, P. (1995). Rapport final sur l'expérimentation "vision mobile" réalisée dans le cadre du contrat "Vision mobile et téléopération". *Cognition et Mouvement*.
- Miller, D.P., & McGovern, D.E. (1988). A laboratory-simulation approach to the evaluation of vision systems for teleoperated vehicles. *International Symposium on Teleoperation and Control*.
- Murray, D.M., Reid, I.D., & Davidson, A.J. (1997). Steering without representation with the use of active fixation. *Perception*, 26, 1519-1528.
- Orliaguet, J.P., & Coello, Y. (1998). Geste d'Homme, geste de machine. *Science & Vie*, 204, 150-156.
- Padmos, P., & Van Erp, J. (1996). Driving with camera view. In A.G. Gale, I.D. Brown, C.M. Haslegrave, H.W. Krusse, & S.P. Taylor (Eds.), *Vision in Vehicles IV*, 232-247. Amsterdam : North-Holland.
- Parasuraman, R., Masalonis, A.J., & Hancock, P.A. (2000). Fuzzy signal detection theory : Basic postulates and formulas for analysing human and machine performance. *Human Factors*, 42, 636-659.
- Patla, A.E., Prentice, S.D., Robinson, C., & Neufeld, J. (1991). Visual control of locomotion : Strategies for changing direction and for going over obstacles. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 17, 603-634.
- Pausch, R., Crea, T., & Conway, M. (1992). A literature survey for virtual environments : Military flight simulator visual systems and simulator sickness. *Presence*, 1, 344-363.
- Péruch, P., & Mestre, D. (1999). Between desktop and head immersion : Functional visual field during vehicle control and navigation in virtual environments. *Presence*, 8, 54-64.
- Pew, R.W. (1974). Human perceptual – motor performance. In B. Kantowitz (Ed.). *Human Information Processing*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Prablanc, C., Pélisson, D., & Goodale, M.A. (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb. I. Role of retinal feedback of target position in guiding the hand. *Experimental Brain Research*, 62, 293-302.
- Rabardel, P. (1993). Représentation dans des situations d'Activités Instrumentées. In Octares (Ed.). *Représentation pour l'action*, 97-111.
- Reinhardt-Rutland, A.H. (1996). Remote operation : A selective review of research into visual depth perception. *The Journal of General Psychology*, 123, 237-248.

- Rosen, J., Hannaford, B., MacFarlane, M.P., & Sinanan, M.N. (1999). Force controlled and teleoperated endoscopic grasper for minimally invasive surgery : Experimental performance evaluation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 14, 375-381.
- Schmidt, R.A. (1975). Scheme theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82.
- Smith, T., & Smith, K. (1990). Human factors of workstation telepresence. In S. Griffin (Ed.), *Third annual workshop on SOAR'89*, 235-250. Houston, TX : NASA Conference Publication.
- So, R.Y. (1994). An investigation of the effects of lags on motion sickness with a head-coupled visual display. *United Kingdom Informal Group Meeting on Human Response to Vibration*. 19-21 September, Institute of Naval Medicine, Alverstoke, Hants, UK.
- Stark, L., & Ellis, S.R. (1981). Scan path revisited : Cognitive models direct action looking. In D.F. Fisher, R.A. Monty, & J.W. Senders (Eds.), *Eye Movements : Cognitive and Visual Perception*, 193-226. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Terré, C. (1990). Conduite à distance d'un robot mobile pour la Sécurité Civile : Approche ergonomique. *Thèse de Doctorat de Psychologie*, Université de Paris V.
- Vercher, J.L., & Gauthier, G.M. (1992). Oculo-manual coordination control : ocular and manual tracking of visual targets with delayed visual feedback of the hand motion. *Experimental Brain Research*, 90, 599-609.
- Warren, W.H., Mestre, D., Blackwell, A.W., & Morris, M.W. (1991). Perception of circular heading from optic flow. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 17, 28-43.