

# **THESE**

présentée devant

**l'UNIVERSITE D'EVRY – VAL D'ESSONNE**

en vue de l'obtention du

**DOCTORAT DE L'UNIVERSITE D'EVRY**

**Spécialité : Robotique & Neurosciences**

par

**Yves RYBARCZYK**

## **Etude de l'appropriation d'un système de téléopération dans l'optique d'une Coopération Homme-Machine**

le 15 Mars 2004

**JURY :**

J.M. Hoc

A. Pruski

P. Rabardel

P. Hoppenot

E. Colle

D. Mestre

# Remerciements

Etant donné le caractère pluridisciplinaire de cette thèse ayant nécessité des allers-retours fréquents entre mon laboratoire de robotique de la région parisienne et les diverses structures neuroscientifiques de Marseille, via l’Auvergne, une page ne suffirait pas à remercier l’ensemble des personnes dont je suis redevable. Néanmoins, j’ai tâché ici de ne pas omettre de citer certains individus qui me tiennent particulièrement à cœur, et que je considère pour la plupart comme des amis, en m’excusant par avance auprès de ceux que j’aurais oublié.

Tout d’abord, je voudrais exprimer ma profonde gratitude envers mes deux directeurs de thèse, messieurs Etienne Colle et Daniel Mestre. Le premier pour avoir fait confiance à un jeune étudiant en neurosciences de s’engager dans un projet de robotique et avoir eu la largeur d’esprit de le laisser déborder dans des contrées où la psychologie l’emporte sur la technologie. Daniel, pour m’avoir pris la main au moment de traverser cette frontière, afin de me guider dans cette quête d’unification entre sciences humaines et sciences technologiques qui fut la nôtre.

Au-delà de ces deux chefs d’orchestre, je tiens à remercier tous ces chercheurs qui partagent souvent plus quotidiennement et plus directement les aléas de vos travaux. Je pense, en particulier, à Philippe Hoppenot pour sa participation active au développement de notre système. A Jean-Claude Lepecq dont les discussions et la culture ont fortement enrichi le contenu scientifique de mon mémoire. Sans oublier tous ceux qui ont eu la patience de bien vouloir se prêter à mes expériences malgré leur caractère parfois rébarbatif.

Je ne puis finir sans saluer mes proches, amis de la Cité Internationale Universitaire de Paris ou membres de ma famille, car ce sont eux qui vous parlent entre mes lignes. Chye (mon frère malaisien), Danielo (o meu amigo do Brasil) et tous les autres dont les origines tant intellectuelles que culturelles vous aident à relativiser vos problèmes scientifiques. Mon frère qui a su me faire partager sa soif de connaissance et sans laquelle ce travail n’aurait très certainement jamais vu le jour. Mon père qui a toujours encouragé ses enfants à poursuivre dans la voie qu’ils avaient choisie. Ma mère dont le soutien fut précieux pour passer les moments difficiles. Enfin, ma compagne Clara dont la douceur et la gentillesse m’ont apporté les armes pour combattre mon plus féroce adversaire de ces dernières années : le doute.

# Table des matières

<b>Chapitre 1 / INTRODUCTION</b>	7
<b>I. Problématique</b>	7
<b>II. La Coopération Homme-Machine (CHM)</b>	8
<b>III. Les caractéristiques d'une situation de téléopération</b>	11
III.1. Définition	11
III.2. Etat de l'art sur les engins de téléopération	13
III.2.1. Engins aériens	13
III.2.2. Engins sous-marins	14
III.2.3. Engins terrestres	15
III.2.4. Domaine médical	17
III.2.5. Assistance à l'handicap	19
III.3. Contraintes techniques	21
III.4. Contraintes humaines	22
III.4.1. Limitations visuelles	22
III.4.2. Limitations proprioceptives	24
III.4.3. Discordances visuo-kinesthésiques	25
<b>IV. La notion d'appropriation</b>	25
IV.1. L'approche instrumentale	25
IV.2. Le concept d'adaptation	27
IV.3. Evaluation de l'appropriation	29
<b>V. Conception ergonomique</b>	32
V.1. Approche anthropomorphique	33
V.2. Application et hypothèse	36

<b>VI.</b>	<b>Organisation générale des chapitres</b>	37
<b>Chapitre 2 / ASPECT MORPHOLOGIQUE : POSITIONNEMENT DU REFERENTIEL VISUEL PAR RAPPORT A L'ORGANE PREHENSEUR</b>		
	<b>Résumé</b>	39
<b>I.</b>	<b>Cadre d'étude</b>	40
	I.1. Organisation de l'espace qui nous entoure	40
	I.1.1. Point de vue psychophysique	40
	I.1.2. Point de vue neuropsychologique	44
	I.1.3. Point de vue neurophysiologique	46
	I.2. Propriétés dynamiques du schéma corporel	52
<b>II.</b>	<b>Objectifs expérimentaux</b>	56
<b>III.</b>	<b>Matériel expérimental : le robot manipulateur MANUS</b>	57
<b>IV.</b>	<b>Evaluation de l'appropriation par rapport à la référence humaine</b>	59
	IV.1. Protocole expérimental	61
	IV.1.1. Sujets	61
	IV.1.2. Conditions	61
	IV.1.3. Procédure	63
	IV.2. Résultats	65
	IV.3. Discussion	67
<b>V.</b>	<b>Modulation de l'excentricité de la caméra par rapport au bras</b>	71
	V.1. Protocole expérimental	73
	V.1.1. Sujets	73
	V.1.2. Conditions	73
	V.1.3. Procédure	75
	V.2. Résultats	76

V.3.	Discussion	77
<b>VI.</b>	<b>Analyse de la dimension motrice du contrôle à distance</b>	<b>80</b>
VI.1.	Protocole expérimental	84
VI.1.1.	Sujets	84
VI.1.2.	Conditions	84
VI.1.3.	Procédure	85
VI.2.	Résultats	86
VI.2.1.	Taux de réussite	86
VI.2.2.	Temps d'exécution du mouvement	87
VI.2.3.	Erreur spatial	89
VI.2.4.	Coordination motrice	91
	<i>Synchronisation bras/pince</i>	91
	<i>Initiation de l'ouverture de la pince</i>	93
VI.3.	Discussion	94
<b>VII.</b>	<b>Conclusions</b>	<b>96</b>

### **Chapitre 3 / ASPECT MORPHO-FONCTIONNEL : IMPLEMENTATION DE MECANISMES D'ANTICIPATION VISUO-MOTRICE**

<b>Résumé</b>		99
<b>I.</b>	<b>Cadre d'étude</b>	<b>100</b>
I.1.	L'information visuelle en tant que facteur critique	100
I.2.	L'anticipation visuo-motrice comme solution comportementale	102
<b>II.</b>	<b>Matériel expérimental : le système télérobotique ARPH</b>	<b>105</b>
<b>III.</b>	<b>Implémentation suivant un modèle non anthropomorphique</b>	<b>107</b>
III.1.	Description du modèle « plate-forme »	107
III.2.	Protocole expérimental	108
III.2.1.	Sujets	108

III.2.2. Conditions	109
III.2.3. Procédure	109
III.3. Résultats	110
III.3.1. Temps d'exécution du parcours	110
III.3.2. Nombre de collisions	112
III.3.3. Nombre d'arrêts	114
III.3.4. Lissage des trajectoires	116
III.3.5. Relation vitesse/courbure	120
III.4. Discussion	123
<b>IV. Implémentation suivant un modèle anthropomorphique</b>	<b>126</b>
IV.1. Description du modèle caméra	126
IV.2. Protocole expérimental	129
IV.2.1. Sujets	129
IV.2.2. Conditions	130
IV.2.3. Procédure	130
IV.3. Résultats	131
IV.3.1. Temps d'exécution du parcours	131
IV.3.2. Nombre de collisions	133
IV.3.3. Nombre d'arrêts	134
IV.3.4. Lissage des trajectoires	136
IV.3.5. Relation vitesse/courbure	139
IV.4. Discussion	141
<b>V. Conclusions</b>	<b>144</b>
<b>Chapitre 4 / CONCLUSIONS GENERALES</b>	<b>149</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>159</b>

# Introduction

## I. Problématique

La source majeure des difficultés que rencontre un opérateur humain placé dans une situation de téléopération réside dans l'écart physique et fonctionnel existant entre l'homme et la machine. Ici, l'individu n'agit qu'indirectement sur l'environnement, par l'intermédiaire d'un système robotique, et ne perçoit également qu'indirectement les résultats de son action, sous forme d'une image vidéo. Le fait que l'entité qui ordonne le mouvement ne soit pas la même que celle qui l'accomplit, va engendrer un appauvrissement sensoriel préjudiciable à l'accomplissement de l'action. En effet, en condition «naturelle», le guidage du mouvement s'effectue à partir d'une intégration des informations afférentes des diverses modalités sensorielles dont dispose l'organisme. En particulier, il existe un dialogue continu entre les systèmes sensoriels visuel et proprioceptif. Il en résulte un gain d'efficacité qui se caractérise par une meilleure précision et une réduction de la variabilité spatiale et temporelle de la réponse motrice, qui fait défaut en téléopération.

De même, les mécanismes de contrôle sensori-moteurs qui, d'ordinaire, sont naturellement automatisés chez l'individu doivent nécessiter maintenant un enclenchement simultané de boutons, avec un nombre de combinaisons possibles très important (Gray & Wilson, 1988). Il se rajoute à ce phénomène, des délais parfois conséquents entre l'exécution du geste de l'utilisateur et le déplacement du robot, engendrant des trajectoires selon ses propres règles de fonctionnement, qui peuvent entraîner de fortes perturbations (Vercher *et al.*, 1989). Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude présente à l'évidence l'ensemble de ces contraintes. Celui-ci consiste en un bras robotique monté sur une plate-forme mobile qui est commandé à distance à partir d'un ordinateur de contrôle. Un clavier constitue l'interface de commande, laquelle est donc du type boîte à boutons, avec ce que cela suggère de difficulté dans la dextérité du contrôle du robot. La supervision de la scène est assurée à travers un champ visuel de taille réduite (50° horizontal) et monoculaire, puisque médiatisé par un écran vidéo. En définitive, les caractéristiques du système télérobotique utilisé semblent loin de permettre une analogie avec les propriétés sensorimotrices humaines.

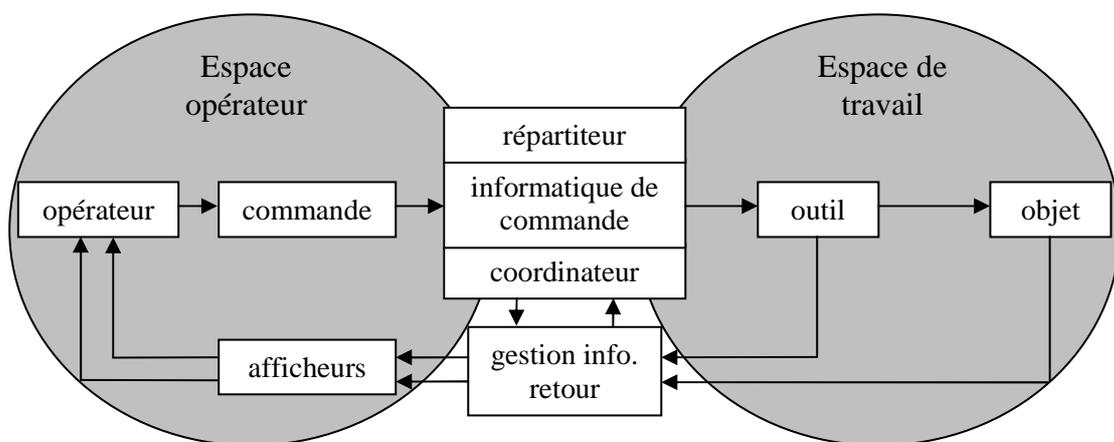
Jusqu'à présent les moyens techniques mis en place pour réduire cet écart n'ont permis qu'une appropriation relativement limitée de la machine par l'opérateur humain (Rabardel, 1993b). C'est pourquoi l'étude qui suit vise à observer une approche « bionique » (discipline née de la fusion entre la biologie et la technologie) de la Coopération Homme-Machine, afin de réduire plus efficacement la différence de nature entre le mode opératoire de la machine et celui de l'homme. Cette démarche consiste à rechercher chez les êtres vivants des modèles morphologiques et/ou de couplages sensori-moteurs, en vue de réalisations techniques mieux adaptées au contrôle d'engins robotisés. 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.

Dans le cas d'une machine semi-automatique, où il existe un souci d'adaptation (au sens piagétien, 1967) de l'outil à l'opérateur, le modèle animal naturellement choisi sera bien évidemment l'homme. Aussi, notre travail va consister à évaluer la nature de l'éventuelle élévation de l'appropriation de l'outil par son utilisateur, suite à la reproduction de propriétés morpho-fonctionnelles de type humaine au sein du dispositif télérobotique, ceci à des fins d'amélioration de la coopération entre l'homme et la machine.

## **II. La Coopération Homme-Machine (CHM)**

Dès les années 70, deux approches de la relation homme-machine se sont opposées. La première visait à mettre en avant le rôle de l'opérateur dans le contrôle du système, alors que la seconde tendait à le remplacer par un dispositif automatique. Les raisons invoquées pour le choix de cette seconde option sont multiples. Le plus important d'entre eux concerne la fiabilité. A la différence des opérateurs humains, les systèmes automatiques sont capables de réaliser parfaitement les tâches pour lesquelles ils ont été conçus. De plus, ils les exécutent avec un niveau de sécurité et de précision très élevé. Au contraire, les variabilités de performance humaine causées par la fatigue, l'âge, le niveau d'expertise... constituent d'importants facteurs limitants. Ainsi, le comportement imprévisible de l'homme représente une composante que l'ingénieur gère beaucoup plus difficilement que les paramètres techniques. A l'inverse, il lui est relativement facile de calculer la détérioration des performances d'une machine en fonction de son usure, ou sa fiabilité en termes de probabilité de panne. Leplat (1985) a d'ailleurs montré que l'approche technique de la fiabilité trouve ses limites avec le calcul de la fiabilité humaine. D'où la stratégie du concepteur d'éliminer la dimension la plus inconnue au sein du système, c'est-à-dire l'homme.

Cette première approche, dite « techniciste » ou « technocentriste », a largement dominé les débats jusque vers la fin des années 80. Puis, l'option du « tout robotique », symbolisée par les projets d'une usine fonctionnant sans intervention humaine, a rapidement été rattrapée par les réalités techniques et économiques d'une vision quelque peu utopique des sociétés modernes (Bainbridge, 1987). On a cessé de traiter l'homme comme la partie faillible du système, pour voir en lui une composante non seulement complémentaire mais également indispensable au bon fonctionnement de la machine. Dans cette seconde approche, l'opérateur humain est considéré comme un élément adaptatif du système. Sa capacité à résoudre des problèmes issus de situations nouvelles est, en effet, une de ses caractéristiques essentielles. L'opérateur devient alors la source des réponses possibles d'un système complexe face aux variations inattendues opérant dans l'environnement dynamique dans lequel celui-ci est immergé. C'est cette nouvelle conception de la relation homme-machine qui a amené la notion de coopération homme-machine, inventée dès les années 70 dans le domaine de la robotique médicale (Guittet, 1988), mais qui ne connut son plein essor qu'à partir des années 80 (Millot, 1988).



**Figure 1 :** Représentation schématique d'un modèle de Coopération Homme-Machine.

La machine est conçue comme un robot non plus autonome, mais fonctionnant en interaction avec l'opérateur (figure 1). Le couplage des deux est assuré par un *coordinateur* chargé de synchroniser l'activité des deux entités. Les tâches sont allouées à l'opérateur ou au robot par un système *répartiteur*. Cette répartition peut être décidée par l'opérateur ou un système expert couplé à l'informatique de commande. Ce type d'interfaçage informatique exige un rebouclage d'informations concernant les modes de commande programmés et

activés, les paramètres de commande, ainsi que de la répartition des tâches. Les fonctions d'analyse de la situation, d'observation de l'état des composantes, de détermination des objectifs de travail de même que de la fonction de décision (répartiteur) et de contrôle (coordinateur), sont toutes des fonctions cognitives et sensori-motrices partagées par l'opérateur et la machine.

Dans ce type d'organisation la répartition des tâches (Gaillard, 1997) ou l'allocation des fonctions (Hoc, 2000), selon les auteurs, entre l'homme et la machine reste le problème central. La solution la plus communément utilisée est de comparer les performances respectives de l'homme et de la machine pour chacune des fonctions qui ont été identifiées. Puis, l'exécution de chaque fonction est attribuée à l'agent disposant potentiellement des meilleures performances (Fitts, 1951). Par exemple, les machines sont considérées comme très adaptées pour effectuer des calculs complexes, alors que les humains sont meilleurs pour faire face à des situations inhabituelles ou inconnues. Pourtant cette stratégie souffre de critiques répétées (Bainbridge, 1987 ; Older *et al.*, 1997). Parmi les plus pertinentes d'entre-elles on en note une. Si l'on applique ce type de répartition, certaines fonctions échoueront à l'opérateur et les autres à la machine. Or, dans tous les cas de figure, il ne faut pas perdre de vue que c'est toujours à l'opérateur humain qu'il incombe la responsabilité finale de l'ensemble de la performance du système homme-machine. D'où la question de savoir comment l'opérateur va contrôler un système qui pourra fonctionner de manière totalement différente de lui. En effet, ce type de stratégie a pour conséquences subversives de projeter l'homme hors de la boucle de contrôle entraînant, de ce fait, un rejet des modes automatiques de contrôle du système (Vanderhaegen *et al.*, 1994 ; Debernard, 1995).

Pour cette raison, il est très dangereux d'enfermer le système homme-machine dans des stratégies, procédures ou allocations de fonctions entre humains et machines trop rigides. Dans les deux dernières décennies, la communication et la coopération homme-machine ont progressivement enrichi les axes de recherche en interaction homme-machine. La communication et la coopération nécessitent davantage d'introduction d'un aspect humain-humain dans la relation humain-machine. La notion de *systèmes cognitifs jointifs* (*joint cognitive systems*) appliquée aux systèmes homme-machine a été une étape décisive vers cette conception (Hollnagel & Woods, 1983 ; Rasmussen *et al.*, 1994 ; Woods & Roth, 1995). Cette notion révèle que le système homme-machine de répartition des tâches n'a pas de sens si l'on considère l'homme et la machine comme des unités isolées. Cet aspect de communication de la coopération est fortement mis en avant par Karsenty et Brézillon (1995). Pour eux, « le système doit faciliter l'appropriation des réponses du système par

l'utilisateur ». Ainsi, le problème dans la coopération ne serait pas tant celui de la répartition des tâches entre l'homme et la machine que celui de l'interprétation du comportement de la machine par l'opérateur humain. La principale difficulté serait alors de concevoir des systèmes dans lesquels il y aurait partage efficace entre intelligence humaine et intelligence artificielle.

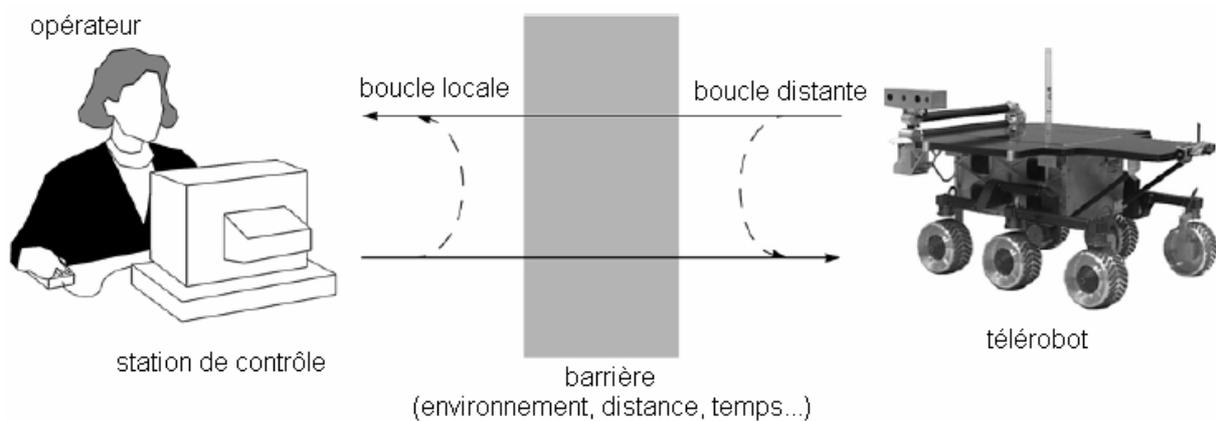
Avant de clore cette section sur la CHM, il est nécessaire d'insister sur quelques points de vocabulaire. Lorsqu'on évoque la coopération homme-machine (CHM), on a trop souvent tendance à la réduire à une étude des interfaces homme-machine (IHM). En effet, étant donné que les relations homme-machine sont actuellement essentiellement de nature homme-ordinateur, les travaux ergonomiques se limitent assez systématiquement à une amélioration de l'interface unissant l'entité humaine à l'entité technologique. Si ce travail reste un point majeur dans le domaine de la convivialité, de l'usabilité, de la transparence..., il n'en demeure pas moins insuffisant dans la conception d'un système homme-machine ergonomiquement adapté. On en a pour preuve de nombreuses études mettant en évidence des défaillances dans l'automatisation concernant des parties du système situées au-delà de la simple interface (Billings, 1991 ; Parasuraman & Mouloua, 1996). Du point de vue de l'opérateur, la machine n'est pas seulement un outil mais aussi un agent potentiellement autonome. Il en résulte qu'un certain nombre de cohérences entre les caractéristiques humaines et celles de la machine doivent être conservées, et ce quelle que soit l'interface. C'est pour ces raisons qu'introduire la notion de coopération dans le cadre de l'étude des relations homme-machine est réellement pertinente. Enfin, ceci est d'autant plus vrai pour une situation dynamique de téléopération, car l'absence de contact physique entre l'opérateur et l'engin téléopéré tend à négliger l'étude ergonomique des composantes du système autres que l'interface. C'est pourquoi ce travail de thèse va s'attacher à rectifier cette tendance en étudiant plus particulièrement la nature de la relation s'instaurant entre un téléopérateur et un bras manipulateur embarqué sur une plate-forme mobile.

### **III. Les caractéristiques d'une situation de téléopération**

#### **III.1. Définition**

La téléopération est la réalisation à distance d'une action. Celle-ci est mise en jeu lorsque l'environnement est jugé trop hostile ou inaccessible à l'homme et quand les opérations à effectuer sont trop imprévisibles ou trop complexes pour être automatisées. Dans

une telle situation l'opérateur est installé à un poste fixe de pilotage et commande à distance un engin pouvant se présenter sous forme de télémanipulateur fixe ou de plate-forme mobile. En retour, il reçoit des informations en provenance du télérobot sur un terminal de visualisation de type ordinateur (figure 2). Bien que certains restreignent le terme de téléopération au contrôle direct (non automatisé), nous considérons que la téléopération englobe tout un spectre allant du contrôle manuel jusqu'à celui de supervision. Pour aller plus loin, nous estimons même que tout bon système de téléopération doit pouvoir fournir un large éventail de types de contrôle et en particulier des modes partagés, essentiels à la réalisation d'une coopération homme-machine.



**Figure 2 :** Situation de téléopération. Un opérateur génère des commandes depuis une station de contrôle et reçoit des feedback sur une interface graphique. L'engin situé à distance exécute les commandes, souvent en utilisant un certain niveau d'autonomie embarquée (adapté de Fong et Thorpe, 2001).

Les engins de téléopération ont plusieurs caractéristiques qui les distinguent de vulgaires dispositifs radiocommandés. Premièrement, les véhicules téléopérés sont des engins qui demandent une grande confiance dans leur système de navigation. En effet, étant donné que ces véhicules évoluent régulièrement dans des environnements inconnus et complexes, des problèmes de navigation peuvent rapidement conduire à une perte du robot. Deuxièmement, le télérobot nécessite un générateur de commande du mouvement efficace. Dans de nombreux cas, la réussite de la tâche est directement corrélée à l'efficacité avec laquelle l'engin se déplace. Enfin, le véhicule a besoin de capteurs pour se localiser. Effectivement, du fait que ces robots couvrent de grandes distances, l'élaboration d'une carte du parcours effectué est un facteur fondamental afin de mener à terme la mission demandée.

## III.2. Etat de l'art sur les engins de téléopération

Les véhicules de téléopération sont apparus au début du 20<sup>ème</sup> siècle, mais ce n'est que dans les années 70 qu'ils ont commencé à être largement employés. Actuellement ces engins sont utilisés pour des applications aériennes, terrestres et mêmes subaquatiques. Etant donné que leur développement s'est effectué au cours de différentes périodes et dans différents domaines, il n'est pas surprenant qu'ils soient référencés suivant plusieurs terminologies, à partir d'abréviations essentiellement anglo-saxonnes (ROV, RPV, UAV, UGV). Cependant, quels que soit les types de système, on leur retrouve toujours beaucoup de caractéristiques et de traits communs.

### III.2.1. Engins aériens

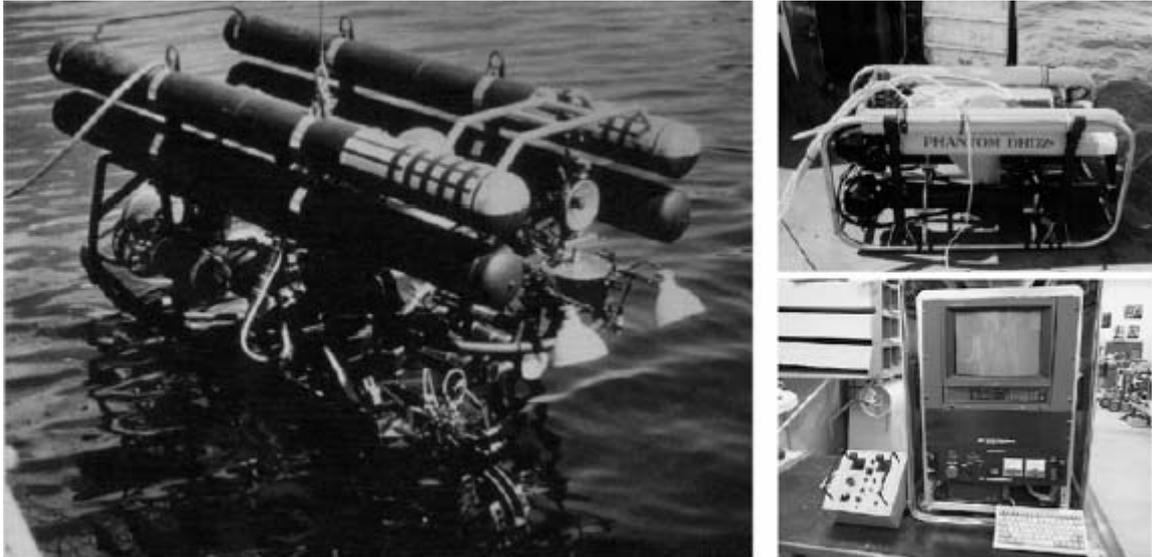
Les appareils aériens sans pilote existent depuis le début des années 1900 (Jones, 1997). Les premiers engins aériens téléopérés étaient les drones, aussi appelés *Véhicules Pilotés à Distance* (RPV, pour *Remotely Piloted Vehicles*). Ils étaient utilisés pour l'entraînement anti-appareils aériens. Des drones tels que le RP-5 de l'armée américaine (1941) volaient grâce à un plan de vol préprogrammé, bien qu'il puisse être occasionnellement piloté par contrôle radio (Bailey, 1996). Durant les années soixante, la NASA a mis en place un programme de développement de *Véhicules de Recherche Pilotés à Distance* (RPRV, pour *Remotely Piloted Research Vehicles*). A la différence des drones, qui étaient généralement de taille réduite, les RPRV étaient des avions habités, modifiés pour être contrôlés à distance (Hallion, 1984). Aujourd'hui, les *Véhicules Aériens Inhabités* (UAV, pour *Unmanned Air Vehicles*) sont les engins téléopérés les plus communément utilisés. Les UAV modernes sont pilotés à distance grâce à une liaison radio ou satellite et sont utilisés pour des tâches telles que la reconnaissance ou l'identification de cibles. Egalement, différents UAV ont été utilisés pour le combat, tel que l'US Navy Pioneer et l'US Air Force Predator (figure 3).



**Figure 3 :** Le UAV Predator transporte une grande variété de capteurs (EO, IR, SAR) et est piloté par un opérateur au sol via une liaison radio ou satellite. Il peut exécuter un plan de vol de manière totalement autonome une fois celui-ci implémenté à bord. A gauche : l'US Air Force Predator. A droite : la station de contrôle du Predator.

### III.2.2. Engins sous-marins

Les *Véhicules Commandés à Distance* (ROV, pour *Remotely Operated Vehicle*) représentent le plus grand marché de ce type d'appareil de téléopération (figure 4). Les ROV sont des sous-marins inhabités qui sont généralement attachés à la surface d'un bateau. Les ROV existent depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle, mais c'est le succès du *Véhicule de Récupération Sous-marine Contrôlé par Cable I* (CCURV I, pour *Cable Controlled Underwater Recovery Vehicle I*), utilisé par l'US Navy en 1966 pour récupérer une bombe atomique, et le boom dans l'exploitation sous-marine des hydrocarbures qui ont lancé leur développement commercial. Aujourd'hui, les ROV sont utilisés sur une large gamme de tâches (surveillance, inspection, océanographie...) et prennent de plus en plus la place des sous-marins habités ou autres scaphandriers. Enfin, bien que beaucoup de ROV soient contrôlés par joysticks et à travers des moniteurs vidéo, quelques systèmes récents incorporent des fonctions autonomes telles que le maintien de position et le suivi de trajectoires.

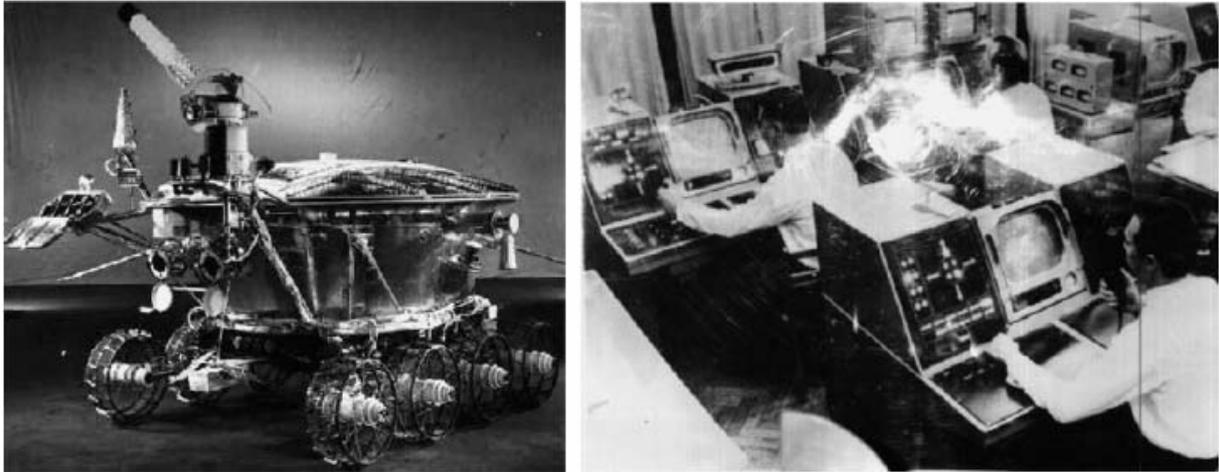


**Figure 4 :** Exemples de véhicules sous-marins commandés à distance de type ROV. A gauche : le véhicule de récupération sous-marine contrôlé par câble CCURV I. A droite : un ROV commercial utilisé pour l'inspection sous-marine et sa console de contrôle.

### III.2.3. Engins terrestres

Les véhicules terrestres sont communément classifiés en trois catégories : les rôdeurs d'explorations, les *Véhicules Terrestres Inhabités* (UGV, pour *Unmanned Ground Vehicles*), et ceux des missions périlleuses. Les rôdeurs d'exploration sont des engins terrestres conçus pour effectuer à distance des tâches scientifiques, telles que sonder les sols et prélever des échantillons. Le premier rôdeur d'exploration fut le Lunokhods soviétique (figure 5) qui a exploré la lune au début des années 70 (Carrier, 1992). Depuis, la NASA a produit de nombreux véhicules de recherche (la série des Rocky, Dantes I/II, Nomad...) et a fait atterrir le rôdeur Sojourner sur Mars.

Les premiers UGV ont d'abord été utilisés pour des tâches nécessitant une navigation à distance telle que la reconnaissance ou la surveillance. Au début des années 80, le Centre des Systèmes Océanique Naval (NOSC) a développé le *Buggy de Dune Téléopéré* (TODB, pour *TeleOperated Dune Buggy*) et le *Véhicule Téléopéré* (TOV, pour *TeleOperated Vehicle*) (figure 6). Ces deux appareils étaient pilotés par copie de commande et à travers une caméra vidéo à vision stéréoscopique. Durant les années 90, le programme Tactical UGV a produit plusieurs véhicules pouvant être conduits soit par contrôle direct soit par simple spécification de points de passage sur le trajet menant à la cible (Gage, 1996).



**Figure 5 :** Le Lunokhod 1 a évolué sur la lune durant onze mois et couvert 10540 m. A gauche : le Lunokhod 1. A droite : la station de contrôle du Lunokhod.



**Figure 6 :** Autres illustrations de véhicules terrestres inhabités. A gauche : le buggy de dune téléopéré TODB. A droite : le véhicule téléopéré TOV.

Les véhicules de missions périlleuses travaillent dans des conditions pour lesquelles ils sont exposés à de graves dangers. Ces situations peuvent aller notamment jusqu'à la destruction par explosion du véhicule. Les premiers systèmes notables de ce genre furent le *Véhicule de Reconnaissance à Distance* (RRV, pour *Remote Reconnaissance Vehicle*) et l'*Appareil de Carottage Commandé à Distance* (RCB, pour *Remote Core Borer*), qui ont été utilisés pour explorer et réparer des réacteurs nucléaires (Whittaker & Champeny, 1988). Les missions périlleuses récentes ont couvert des applications relativement étendues telles que : l'examen méticuleux et la désactivation de mines (Hainsworth, 1993), le désamorçage de bombes (Graves, 1997), et des diagnostics sur l'état du réacteur de Chernobyl (figure 7) (Blackmon *et al.*, 1999).



**Figure 7 :** Le robot Pioneer a été conçu pour inspecter et diagnostiquer l'état du réacteur nucléaire de Chernobyl. A gauche : le robot Pioneer. A droite : sa station de contrôle.

#### III.2.4. Domaine médical

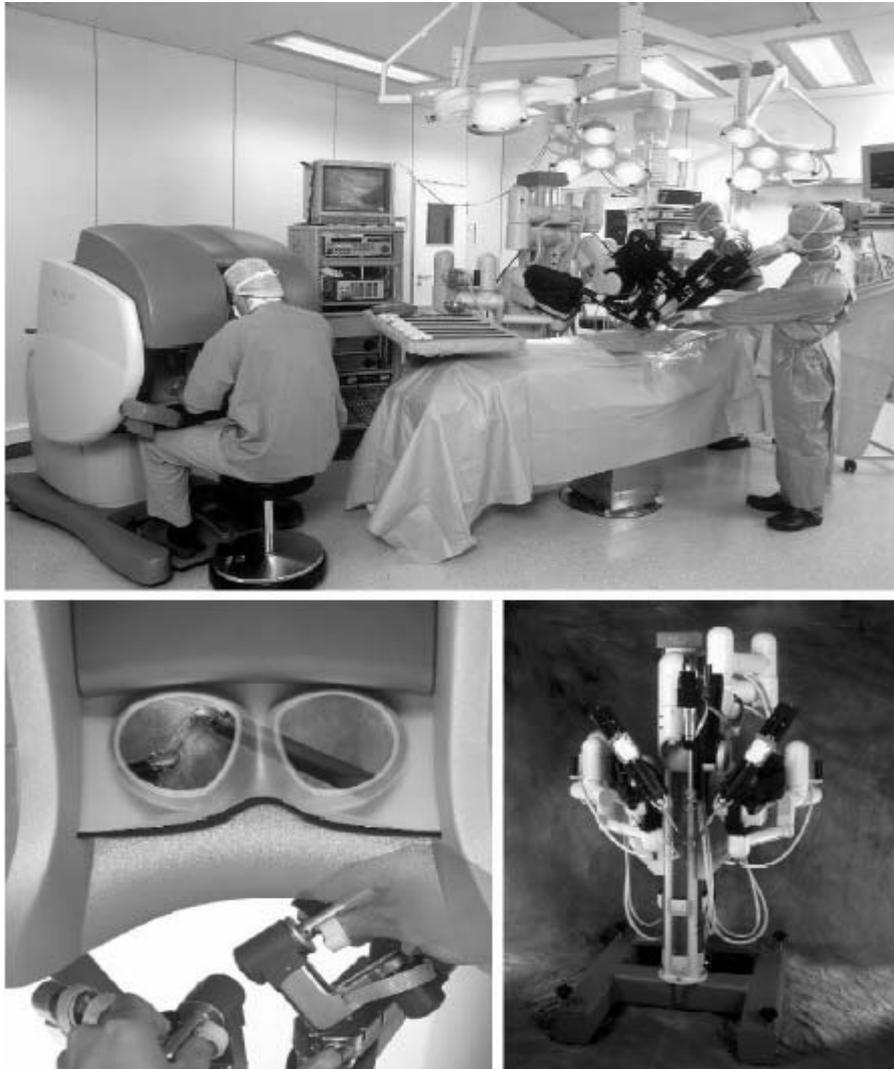
On peut également rencontrer des engins de téléopération qui sont spécifiquement employés pour la télémanipulation. Dans ce type de télérobot, les avancées les plus remarquables ont été réalisées dans le domaine médical et plus spécifiquement dans celui de la chirurgie. Pour le moment, deux systèmes de robots téléchirurgicaux sont commercialement disponibles : le « Da Vinci » (Intuitive Surgical, Inc.) et le Zeus (Computer Motion, Inc). Les deux systèmes présentent une même architecture de base : deux bras contrôlent les instruments chirurgicaux et un troisième guide la caméra endoscopique. Le chirurgien manipule les bras robotiques à travers une console au niveau de laquelle il peut superviser à distance le déroulement de l'opération.

Le système Da Vinci est composé de trois éléments principaux (figure 8). Tout d'abord des moniteurs vidéo qui fournissent des images du site chirurgical ainsi que des informations utiles pour les assistants. Puis, une table d'opération équipée d'une console où sont fixés trois bras robotiques munis d'instruments chirurgicaux. La particularité des instruments utilisés par le système Da Vinci est qu'ils disposent d'une extrémité distale qui possède deux degrés de liberté supplémentaires<sup>1</sup>, ce qui augmente ainsi significativement leur maniabilité. Enfin, le chirurgien est assis à une autre console depuis laquelle il peut contrôler

---

<sup>1</sup> Du fait de ces degrés de liberté rajoutés au bout de l'outil chirurgical, ces instruments sont appelés, en anglais, « Endo-Wrist tool-ends » pour spécifier que la position de cette articulation s'apparente à celle du poignet.

les instruments et recevoir une image 3D générée par la caméra multi-lentilles qui équipe l'endoscope.



**Figure 8 :** Le système Da Vinci. En haut : une vue globale du dispositif. En bas à gauche : la console de contrôle d'où opère le chirurgien. En bas à droite : la console où sont fixés les trois bras robotiques utilisant des instruments *Endo-Wrist tool-ends*.

Malgré sa similarité architecturale avec son concurrent, le système Zeus présente quelques singularités. Les bras robotiques sont directement fixés à la table chirurgicale (figure 9). Ceux-ci peuvent être mobilisés selon trois degrés de liberté, mais ne sont pas équipés d'instruments du type *Endo-Wrist tool-ends*. Cela signifie que le système Zeus présente deux degrés de liberté en moins que le Da Vinci et, donc, qu'il est plus difficilement maniable. En ce qui concerne la position du chirurgien, celle-ci est également localisée au niveau d'une console depuis laquelle il contrôle à distance les bras manipulateurs. Il bénéficie aussi d'une

image 3D, mais elle ne peut être vue sur un écran que via le port d'une paire de lunette spéciale. Ce système a néanmoins fait ses preuves lors de l'« opération Lindbergh » (septembre 2001) qui constitue, à ce jour, l'expérience téléchirurgicale effectuée sur la plus longue distance (Marescaux *et al.*, 2001).



**Figure 9 :** Le système Zeus rendu célèbre lors de l'opération chirurgicale transatlantique « Lindbergh ». En haut : un aperçu de la globalité du dispositif. En bas à gauche : les trois robots manipulateurs. En bas à droite : l'interface de contrôle du chirurgien.

### III.2.5. Assistance à l'handicap

Un champ d'application de la téléopération qui est resté jusqu'alors encore inexploité est celui de l'assistance aux personnes handicapées. C'est pourquoi a été lancé le projet ARPH (Assistance Robotisée pour Personnes Handicapées) mené en collaboration entre le

Laboratoire Systèmes Complexes (LSC) de l'Université d'Evry et l'Association Française de lutte contre les Myopathies (AFM), et dans lequel s'inscrit ce travail de thèse. L'objectif du programme ARPH est d'embarquer un bras manipulateur (MANUS) sur une base mobile autonome (figure 10) pour donner aux personnes handicapées la possibilité de réaliser seules des tâches de la vie quotidienne. Afin de rendre un tel projet viable, ce travail doit répondre à au moins deux nécessités. La première est une écoute des besoins que revendiquent les personnes handicapées. En particulier, celles-ci ne désirent pas que le robot les assiste entièrement mais qu'au contraire, elles restent dans la mesure de leurs capacités les plus actives possibles. La seconde contrainte est d'ordre financière. En effet, le coût de la recherche dans des domaines de hautes technologies tels qu'en téléopération peut devenir rapidement très élevé. Aussi, si l'on veut que ce système soit accessible à la plus grande majorité des personnes concernées, celui-ci doit répondre au plus faible coût financier possible. Ainsi, notre conception technique veille à respecter un compromis entre le prix et la fiabilité des composants utilisés.



**Figure 10 :** Le robot ARPH est composé d'une plate-forme mobile sur laquelle est embarqué un bras manipulateur. Son but est d'augmenter l'autonomie des personnes à mobilité réduite.

Dans un tel contexte, la coopération homme-machine occupe une place centrale. Les différentes tâches à réaliser sont réparties entre les deux entités afin que la mission se réalise dans les meilleures conditions de satisfaction pour l'opérateur. La détection des erreurs de localisation, la commande de la base mobile et du bras manipulateur sont des fonctions effectuées en collaboration entre l'homme et la machine. Pour cela, le contrôle de la plate-forme mobile incorpore trois types de modes de commande. En *manuel*, l'opérateur pilote

directement la base mobile. En *automatique*, l'opérateur se contente de définir la mission, puis le robot la réalise automatiquement. Entre ces deux extrêmes se situent les *modes partagés* qui représentent toutes les combinaisons possibles des deux modes précédents. Dans l'optique d'une CHM efficace, le passage d'un mode à l'autre et l'utilisation des modes partagés nécessitent que l'opérateur comprenne les comportements automatiques du robot. C'est ce genre de problématique et ses possibles résolutions qui sont développés expérimentalement dans la suite de cette thèse.

Enfin, il faut préciser que, malgré sa vocation, ce travail n'a pas fait l'objet d'une étude systématique sur des personnes handicapées mais sur des individus valides. Deux raisons principales ont contribué à ce choix. Premièrement, étant donné l'état encore expérimental du dispositif sur lequel nous travaillons, il aurait pu être relativement dangereux d'y exposer une personne ne disposant pas de la totalité de ses capacités. Deuxièmement, des travaux menés sur notre interface visuelle de contrôle (Hoppenot & Colle, 2001) ont mis en évidence une absence de différence significative entre la performance des handicapés et celle des valides. Ce résultat nous suggère donc la possibilité d'évaluer le système suivant deux étapes. Des premières évaluations peuvent être entreprises sur des personnes valides au cours des phases initiales de conception puis, seulement lorsque le prototype sera plus avancé, la validation sur la population cible deviendra impérative.

### **III.3. Contraintes techniques**

Les systèmes de téléopération sont sujets à plusieurs types de contraintes. Les premières d'entre-elles concernent le facteur technologique. Il existe trois principales variables qui vont pouvoir affecter fortement l'efficacité et l'aisance de la réalisation d'une mission téléopérée. En premier lieu, il y a la bande passante. Celle-ci va jouer sur la qualité et la quantité d'informations fournies par le robot sur son environnement. Ces caractéristiques sont des éléments clés pour l'opérateur, car ce sont-elles qui lui faciliteront la représentation de la situation et donc la prise des bonnes décisions. Un autre problème lié à la qualité de l'information est le délai de transmission. Ce délai prend en compte le traitement des données et le temps inhérent à leur transfert. Il a été montré (McGovern, 1990) qu'au-delà d'un certain délai, il devenait difficile pour un opérateur de contrôler un robot par commande directe (i.e. en utilisant un joystick ou tout autre mécanisme de commande de direction instantanée). Ce délai limite a été quantifié aux environs des 250 millisecondes par des études neuroscientifiques (Vercher & Gauthier, 1992).

Enfin, le dernier facteur limitant concerne les capteurs embarqués. En effet, même dans le cas d'une transmission idéale sans délai ni limitation de bande passante, la perception de l'environnement du robot par l'opérateur reste liée au nombre, à l'efficacité et à la diversité des capteurs embarqués sur l'engin. Les capteurs de distance les plus classiques (ultrasons ou infrarouges) offrent des informations très limitées et peu fiables. Une alternative courante à ces capteurs de base est l'utilisation d'une caméra, l'image étant un des outils les plus naturels à l'homme. D'une image simple transmise à l'opérateur jusqu'aux modèles beaucoup plus complexes de reconstruction tridimensionnelle de l'environnement, basés sur la vision stéréoscopique, les applications de vision varient passablement. Le choix est généralement un compromis entre qualité de l'information et temps de traitement/transmission de l'image. Ces contraintes techniques ne constituant pas la dimension principale de cette thèse, un aperçu plus détaillé de cet aspect peut être trouvé dans les travaux de Kay (1997). En revanche, nous allons davantage nous attarder sur le problème du facteur humain car il représente notre question centrale.

### **III.4. Contraintes humaines**

L'être humain possède des capacités remarquables d'adaptation à l'environnement. Il peut ainsi se déplacer et interagir avec les objets du monde extérieur avec une grande facilité et réagir de façon appropriée à bon nombre de situations nouvelles. Ceci est dû en majeure partie à la richesse et à la diversité des informations sensorielles (visuelles, auditives, tactiles, vestibulaires et somesthésiques) le renseignant en permanence sur l'état du monde extérieur, mais également sur l'état de son propre corps. Toutefois, il est des situations inhabituelles pour lesquelles une partie de ces informations sont dégradées, voire absentes. La situation de téléopération en fait partie. Les contraintes de cette condition tendent l'opérateur à surexploiter essentiellement deux modalités sensorielles qui sont, par ordre d'importance, la vision et la proprioception. C'est donc la nature des limitations dans ces deux modalités ainsi que leurs conséquences sur la performance humaine que nous allons détailler dans les sections suivantes.

#### **III.4.1. Limitations visuelles**

L'utilisation d'un écran vidéo pour le guidage des déplacements segmentaires (saisie et déplacement d'objets, graphismes...) s'accompagne souvent d'une détérioration des

performances par rapport à une situation de contrôle direct, ceci même lorsque la taille et l'orientation de la scène visuelle ne sont pas modifiées (Smith & Smith, 1990). Cette détérioration se traduit par une difficulté à évaluer les positions relatives des éléments structurant la scène visuelle, ce qui affecte en particulier l'évaluation des distances relatives. Selon Massimo et Sheridan (1989) cette baisse de performance résulterait de la constriction du champ visuel, du fait d'une réduction des indices permettant en situation naturelle la perception de la structure de l'espace d'action. Cette réduction concerne au niveau rétinien les indices monoculaires statiques (interposition, taille, luminance relative et disparité monoculaire) et dynamiques (parallaxe de mouvement et accommodation) de profondeur spatiale. Par ailleurs, la scène visuelle est projetée sur un plan bidimensionnel rendant inopérants certains indices binoculaires de profondeur comme la disparité et la parallaxe binoculaire (Cutting & Vishton, 1988 ; Reinhardt-Rutland, 1996). A cela s'ajoute le fait que les mouvements de l'observateur ne génèrent pas de flux optique (déplacement sagittal) ou de parallaxe de mouvement (déplacement latéral), information intervenant également dans la perception de la profondeur spatiale (Bingham & Pagano, 1998 ; Cornilleau-Péres & Gielen, 1996).

De même, il devient impossible de déterminer la distance à laquelle se trouve un objet uniquement à partir de sa taille rétinienne (dans l'hypothèse d'un objet familier), puisque cette dernière ne dépend plus uniquement de la distance à laquelle se trouve l'objet par rapport au point d'observation, mais également de sa distance par rapport à l'objectif de la caméra. Les seuls indices subsistants semblent être certains indices picturaux, tels que la distance relative sur l'écran, la variation progressive de la taille ou de la densité des éléments composants les surfaces (texture) et la perspective. Cependant, les informations de distance fournies par ces indices sont nécessairement dépendantes du rapport d'échelle entre l'espace physique et l'espace visuel projeté, ce qui rend difficile l'estimation de la position des objets relativement à l'observateur. Cette estimation est d'autant plus difficile à réaliser que l'environnement visuel est parfois peu texturé (i.e. exploration d'une surface homogène) et que la qualité de l'image est souvent réduite. Dans le cas de la téléchirurgie, par exemple, la résolution spatiale de l'image est faible, la lentille de l'endoscope souvent entachée de particules provenant des tissus internes, l'éclairage est faible... (Grimbergen, 1997). En définitive, il apparaît que la baisse de performance observée en téléopération est due en grande partie à la réduction des indices spatiaux permettant la perception de la profondeur (Ferrel *et al.*, 2001). C'est ce que confirme les travaux réalisés en psychophysiques qui mettent en évidence, en condition naturelle, une diminution de la précision spatiale des

mouvements lorsque ceux-ci sont exécutés à travers un espace visuel de taille réduite (Coello & Greal, 1997) ou peu structuré (Coello & Magne, 2000).

#### III.4.2. Limitations proprioceptives

Les situations de téléopération induisent généralement une baisse d'efficacité des systèmes proprioceptifs et tactilo-kinesthésiques. Or, le contrôle de la motricité fine s'appuie justement sur les propriétés kinesthésiques du mouvement, en particulier les retours de force résultant de l'interaction avec les objets qui offrent une résistance à la déformation. En chirurgie classique, par exemple, l'incision d'un tissu organique repose en partie sur une évaluation kinesthésique et tactile de sa résistance au contact des outils. Cependant, la même opération chirurgicale réalisée sous contrôle vidéo limite l'utilisation de ces informations dynamiques. En raison du moment d'inertie induit par la longueur des outils utilisés, les retours de forces sont moins susceptibles de permettre une évaluation des caractéristiques du mouvement, ainsi que de la structure et de la résistance des tissus manipulés (Bholat *et al.*, 1999). Par ailleurs, les contraintes mécaniques liées au nombre de degrés de liberté du télémanipulateur et à leur coordination diminuent la précision du guidage tridimensionnel du mouvement (Schurr *et al.*, 2000).

Pour remédier à ces difficultés, on voit se développer des aides au guidage manuel s'appuyant sur une augmentation du sens du toucher par un dispositif de retour de force amplifié (MacFarlane *et al.*, 1999 ; Rosen *et al.*, 1999). En absence de ces systèmes palliatifs (qui sont pour la plupart encore en phase de développement), la discrimination des variations fines des textures et de la résistance des surfaces à la déformation doit davantage s'appuyer sur les informations visuelles que kinesthésiques ou somatosensorielles, notamment pour les structures présentant de faibles variations de densité (Grimbergen, 1997 ; Stassen *et al.*, 1998). Cette dernière observation confirme bien le rôle primordial de la vision dans l'organisation et le contrôle des actions, puisque selon certains auteurs (Gaillard & Terré, 1989 ; Terré, 1990) elle serait responsable d'environ 80% de la performance du téléopérateur. C'est une des raisons pour laquelle notre travail de thèse va essentiellement s'appuyer sur une exploitation de cette modalité sensorielle.

### III.4.3. Discordances visuo-kinesthésiques

En situation naturelle, l'organisation et le guidage des segments corporels s'appuient largement sur une mise en correspondance des informations proprioceptives (plus généralement tactilo-kinesthésiques) et visuelles (Jeannerod, 1988). Dans les tâches visuo-manuelles (saisie et déplacement d'objets, pointage sur des éléments de l'espace proche...), les mouvements sont en effet plus précis lorsque ces informations sont disponibles avant et pendant le déroulement de l'action. Ce gain d'efficacité se caractérise essentiellement par une variabilité spatiale et temporelle plus faible des trajectoires. Or, l'introduction d'un écran vidéo entre le geste perçu et le geste réellement effectué en situation de télémanipulation entraîne un décalage entre ces deux sources d'informations induisant une détérioration des performances motrices.

Une première source de difficulté provient de l'impossibilité de visualiser et de réaliser des mouvements dans un même plan de l'espace. En effet, l'écran vidéo servant au contrôle des mouvements étant positionné verticalement en face ou sur le côté de l'opérateur, les mouvements de manipulation d'objets sont suivis visuellement dans le plan fronto-parallèle, alors qu'ils sont habituellement réalisés dans le plan sagittal. Par ailleurs, l'orientation de la scène visuelle sur l'écran vidéo va dépendre de la position et de l'orientation de la caméra. De ce fait, une absence d'isomorphisme entre la direction du mouvement dans l'espace de travail et celle dans l'espace de l'opérateur est fréquente. En outre, l'éloignement de la caméra ainsi que les variations de la distance focale de l'optique utilisée vont influencer la taille apparente des éléments présents dans le champ visuel ainsi que les écarts relatifs entre ces éléments. L'opérateur doit donc apprendre à réorganiser son espace sensori-moteur afin de pouvoir réaliser des tâches de haute précision (Orliaguet & Coello, 1998). Ceci justifie pleinement la nécessité d'étudier la manière de s'appropriier un système d'action médiatisé, dans le but de concevoir un dispositif plus ergonomiquement adapté à l'homme.

## **IV. La notion d'appropriation**

### **IV.1. L'approche instrumentale**

Pour bien comprendre l'idée d'appropriation d'une machine, ou plus généralement d'un instrument par un utilisateur, il est nécessaire de replacer cette notion dans son cadre

psychologique d'origine. Le premier chercheur à avoir tenté un réel rapprochement entre la psychologie et la technologie fut Vygotsky. Son approche vise à placer les activités avec instrument au cœur du problème de la constitution et du fonctionnement des processus cérébraux de l'homme (Vygotsky, 1930). Il constate que l'intégration de l'instrument dans le processus de comportement met en action toute une série de nouvelles fonctions liées à l'usage et au contrôle de celui-ci. Ainsi, les propriétés de l'outil se substituent à et rendent inutile toute une série de processus naturels. Enfin, la présence de ce médiateur entre l'organisme et le milieu transforme le déroulement et les aspects particuliers de tous les processus psychiques qui entrent dans la composition de ce qu'il appelle l'acte instrumental. Cet acte est défini comme l'ensemble des fonctions qui sont spécifiquement associées et coordonnées suivant les caractéristiques propres à l'instrument.

Les travaux menés dans le domaine de la robotique par Rabardel (1990 ; 1991 ; 1993a) vont dans le prolongement de cette recomposition de l'activité suivant une approche instrumentale de la relation homme-machine. Selon cet auteur, l'instrument est à considérer comme une entité mixte qui ne peut se réduire à l'artefact, c'est-à-dire sa composante physique. Au contraire, il tient à la fois de l'objet et du sujet. Un instrument est donc formé de deux composantes. D'une part, il est constitué d'un artefact, matériel ou symbolique produit par le sujet ou par d'autres. Et d'autre part, il se compose d'un ou de plusieurs schèmes<sup>2</sup> d'utilisation associés, résultant d'une construction propre du sujet, autonome ou résultant d'une acquisition de schèmes sociaux d'utilisation. Cela signifie que l'instrument n'est pas seulement une partie du monde externe au sujet mais qu'il est aussi le produit de l'activité de son utilisateur.

Cependant, bien qu'elles soient associées l'une à l'autre, les composantes artefactuelles et schématiques se retrouvent également dans une relation d'indépendance relative. Un même schème d'utilisation peut s'appliquer à une multiplicité d'artefacts appartenant à la même classe (i.e. les schèmes de la conduite automobile sont transposés d'un véhicule à l'autre par le sujet), mais aussi relevant de classes voisines ou différentes (dans ces conditions les conséquences peuvent être assez dramatiques, comme c'est le cas pour l'élargissement de l'utilisation des propriétés chauffantes d'un four micro-onde à celles de séchage d'un animal domestique). Inversement, un artefact est susceptible de s'insérer dans

---

<sup>2</sup> Le schème d'une action est l'ensemble structuré des caractères généralisables de l'action qui permettent de répéter la même action ou de l'appliquer à de nouveaux contenus. Ainsi, il constitue un canevas général qui peut se reproduire en des circonstances différentes et donner lieu à des réalisations variées. Par exemple, dans le cas de la préhension, bien qu'on tend plus ou moins le bras ou qu'on ouvre plus ou moins la main selon l'éloignement ou la taille de l'objet, il s'agit toujours du même schème de saisie (Montangeron & Maurice-Naville (1994).

une multiplicité de schèmes d'utilisation qui vont lui attribuer des significations et parfois des fonctions différentes. Par exemple, à une paire de tenailles pourra être associé le schème « frapper », la transformant ainsi en un instrument de même fonction qu'un marteau.

Un instrument permanent, susceptible de conservation et de réutilisation, va donc consister en l'association stabilisée de deux invariants qui, solidairement, constituent un moyen potentiel de solution de traitement et d'action dans une situation. Cependant, le problème de la constitution de l'instrument permanent, de sa genèse, se pose : c'est le problème de la constitution de ses deux invariants schématiques et artefactuels. Que ce soit du côté du schème ou de celui de l'artefact, cette construction ne se réalise généralement pas ex-nihilo. Les artefacts sont généralement préexistants, mais sont tout de même instrumentalisés par le sujet. Les schèmes sont le plus souvent issus du répertoire du sujet et généralisés ou accommodés au nouvel artefact, parfois des schèmes entièrement nouveaux doivent être construits. Aussi, pour comprendre comment s'effectue la genèse de la construction de l'entité instrumentale, il est nécessaire de faire appel à la conception piagétienne d'adaptation à l'environnement.

#### **IV.2. Le concept d'adaptation**

Selon Piaget, l'intelligence est avant tout adaptation (Piaget, 1936). La complexité de l'organisation de l'être vivant se comprend par la relation d'équilibre qui s'instaure entre l'individu et le milieu. Cet équilibre est rendu possible par des transformations qui s'opèrent au sein de l'organisme en fonction des caractéristiques de l'environnement avec lequel il interagit. Au final, ces modifications ont toujours pour vocation de favoriser les échanges milieu-individu, favorables à la conservation de ce dernier. Pour Piaget, qui analyse la naissance de l'intelligence dans sa dimension sensori-motrice, l'adaptation peut se décomposer en deux processus complémentaires.

Le premier est le processus d'assimilation. Selon cet auteur, toute réalité extérieure au cycle d'organisation<sup>3</sup> du sujet qui répond à un besoin pour l'organisme est susceptible d'assimilation. Ce processus se définit comme la tendance d'une conduite à être conservée. Cela est rendu possible grâce à une certaine répétition de la conduite en question qui ainsi se schématise, c'est-à-dire qu'elle donne naissance à un ou plusieurs schèmes. Ceux-ci, constituant un ensemble structuré des caractères généralisables de l'action, vont permettre la

---

<sup>3</sup> En référence à cette terminologie, Piaget a parlé plus tard d'auto-organisation (Piaget, 1974).

reproduction d'une même action voire son application à de nouveaux contenus (Piaget & Beth, 1961).

Par ailleurs, ces schèmes constituent une organisation active de l'expérience vécue qui intègre le passé. Ils comprennent donc une structure qui a une histoire et se transforme au fur et à mesure de la diversité des situations rencontrées. Ainsi, l'histoire d'un schème est celle de sa généralisation mais aussi de sa différenciation aux contenus auxquels il s'applique. La généralisation est conceptualisée par le processus d'assimilation. Concrètement, par leur proximité d'apparence ou de situation, des objets nouveaux peuvent être assimilés dans des schèmes préexistants et se voir par là même attribuer des significations qui contribuent, de plus, à un élargissement du réseau de connaissances. La propriété de différenciation, quant à elle, fait référence au second processus responsable de l'adaptation : le processus d'accommodation.

Lorsque les réalités extérieures ne permettent pas une assimilation directe, il se met en place au niveau des schèmes un mécanisme d'accommodation. Cette accommodation, réduite dans les premiers mois de la vie à un simple ajustement global, donne lieu par la suite à des tâtonnements dirigés et à des conduites expérimentales de plus en plus précises. Si on prend l'exemple de l'acquisition de la conduite du bâton chez le jeune enfant (Piaget, 1936), on comprend tout à fait la nature complémentaire de ce processus avec celui de l'assimilation. Dans cette expérience, un enfant est placé face à un sofa sur lequel est posé une gourde et, à portée de sa main, est laissé un bâton avec lequel il a frappé des objets auparavant. Dans un premier temps, il tente de saisir directement la gourde, puis tape avec le bâton et fait tomber l'objet par hasard. Quand la gourde est déjà à terre, il continue à frapper en observant les mouvements obtenus, puis finit par pousser l'objet avec le bâton pour le ramener vers lui. Plus tard, en l'absence du bâton, il saisit un livre pour rapprocher l'objet.

L'enfant a donc, tout d'abord, mis en œuvre un schème déjà constitué (taper avec un bâton), mais cette assimilation de la situation au schème ne permet pas de réussir à chaque fois. D'où, le schème va progressivement être accommodé afin de gérer le déplacement de l'objet, jusqu'à aboutir à un nouveau schème : pousser avec un bâton. Enfin, celui-ci sera généralisé à d'autres objets, ici un livre. Or, il en va de même pour la relation homme-machine. L'élaboration des schèmes sensori-moteurs chez le jeune enfant s'adaptant à son environnement est relativement transposable à la situation de l'opérateur devant se construire des schèmes d'action adaptés au fonctionnement de la machine. Ainsi, lorsque la machine présente des modes de fonctionnement assez proches de ceux de l'homme, ceux-ci peuvent être directement assimilés aux schèmes préexistants de l'opérateur. Au contraire, dans le cas

où le dispositif s'avère complètement différent, le sujet a la nécessité d'accommoder. C'est donc ce principe d'adaptation, au sens piagétien du terme, appliqué à la relation homme-machine que nous qualifions ici de mécanisme d'appropriation<sup>4</sup>.

### IV.3. Evaluation de l'appropriation

Une grande question posée par les travaux sur la coopération homme-machine est celle de l'évaluation de la qualité ergonomique d'un système. En ce qui nous concerne, nous qualifions comme machines ergonomiquement adaptées à l'homme toutes machines que l'individu est capable de s'approprier. Le problème est d'identifier des marqueurs qui nous permettront de mettre en évidence l'instauration éventuelle de ce phénomène d'appropriation. Pour cela on peut s'aider des travaux réalisés dans le domaine de la réalité virtuelle (RV) et plus précisément de ceux qui portent sur la recherche du niveau de *présence*. En effet, ce concept possède un certain nombre de dimensions qui s'apparentent beaucoup à celles de l'appropriation. Ainsi, la présence est définie comme la sensation d'*être là (being there)*, d'être à la place de cet avatar qui nous représente dans l'environnement virtuel (EV). D'ailleurs, Minsky (1980) parle de *téléprésence* pour évoquer le phénomène par lequel l'opérateur humain développe la sensation d'être physiquement présent dans l'espace sur lequel il agit indirectement via la machine. Aussi, si Sheridan (1992) préfère attribuer le terme de *présence virtuelle* pour la RV et de *téléprésence* pour la téléopération, du point de vue de l'analyse neuroscientifique cette distinction n'apparaît pas nécessaire (Ijsselsteijn *et al.*, 2000).

Le dénominateur commun entre la sensation de présence en environnement virtuel et la sensation d'appropriation en téléopération est la modification de la représentation mentale du corps. Les sujets qui ont vécu le phénomène de présence rapportent avoir été davantage situés dans l'espace virtuel que dans celui où ils étaient physiquement localisés (Slater & Usoh, 1993). C'est ce que Loomis (1992) désigne sous la terminologie d'*attribution distale de soi* à l'entité nous représentant dans l'environnement virtuel. Pour cet auteur, une distinction doit être faite entre corps phénoménal et corps physique. Il y aurait ainsi, dans un environnement virtuel, trois corps au total. Le corps objectif qui correspond au corps physique, observable et mesurable de l'utilisateur. Le corps virtuel qui est la représentation du

---

<sup>4</sup> Ce terme largement usité dans le domaine des recherches pédagogiques pour faire référence aux capacités d'apprentissage d'outils éducatifs par l'enfant, n'est pas directement employé selon cette assertion en ce qui concerne notre étude. En réalité, il est davantage à relier avec le sens que lui porte Bullinger (1987), lequel s'attache à mettre en évidence le phénomène d'appropriation au niveau de l'intégration sensori-motrice.

corps de l'utilisateur à l'intérieur de l'EV. Et, enfin, le schéma corporel qui est la représentation interne ou mentale que l'utilisateur a de son propre corps. D'où, lorsque l'individu interagit avec un environnement médiatisé, son schéma corporel pourrait être radicalement altéré par oscillation entre corps physique et corps virtuel (Meyer & Biocca, 1992). Cette situation est tout à fait transposable à la téléopération. De même que l'utilisateur peut identifier son corps à celui de l'avatar, l'opérateur peut assimiler le bras manipulateur comme une extension de son propre bras, pour parvenir à une certaine incorporation du robot dans son schéma corporel.

Dans le domaine de la RV, Ijsselsteijn (2002) identifie trois niveaux d'analyse pour évaluer cette sensation d'*incarnation (embodiment)* du sujet. Ces trois niveaux d'explication sont le phénoménologique, celui des processus comportementaux et enfin des mécanismes cérébraux sous-jacents. Si les deux premiers niveaux ne posent pas réellement de problème pour l'expérimentation scientifique, il n'en est pas de même en ce qui concerne le dernier. En effet, les moyens techniques d'investigation des processus cérébraux (EEG, TEP, IRMf...) offrant encore des degrés de résolution spatiale et temporelle trop faibles, ce niveau reste relativement inexploré puisque inexorable. De plus, cette expérience d'incarnation impliquant potentiellement l'association d'un grand nombre de processus neuronaux, la nature et la localisation de ceux-ci risquent de demeurer une dimension encore pour longtemps inconnue. Pour ces raisons, notre évaluation de l'appropriation du système de téléopération par l'opérateur va se limiter aux deux premiers niveaux d'explication.

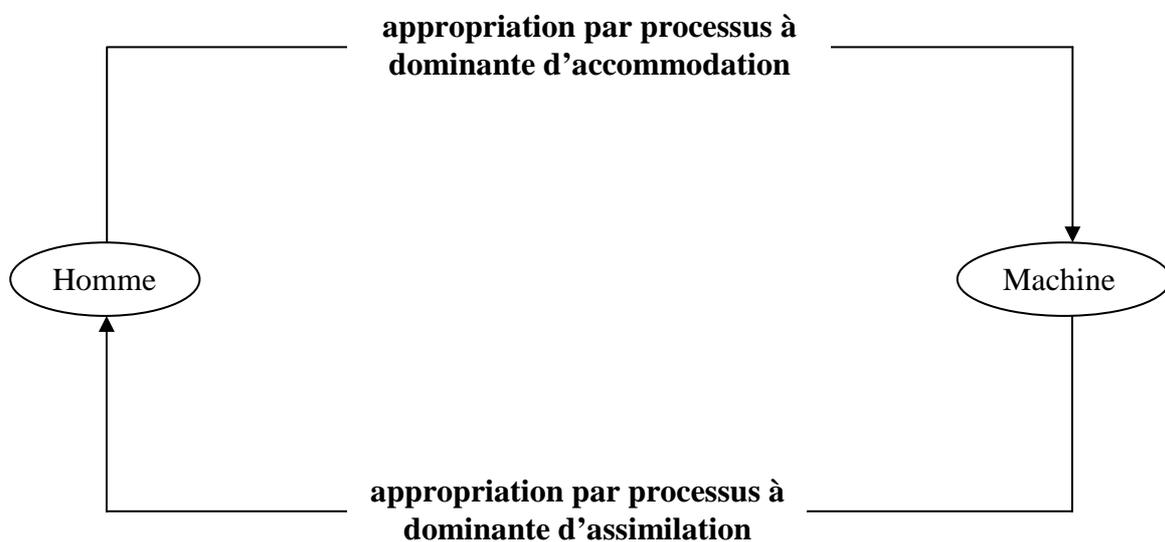
Le niveau phénoménologique englobe tout ce qui concerne la performance brute du sujet. Précisément, cette analyse se penche sur la valeur quantitative des données obtenues sans s'intéresser à un profil plus qualitatif de ces résultats. Si ce niveau est très informatif sur l'efficacité avec laquelle l'opérateur contrôle le système, il ne nous dit que peu de choses sur la nature des processus d'adaptation s'instaurant entre l'homme et la machine. En fait, il limite les modèles à une simple description et classification plutôt que de donner une réelle explication du « pourquoi » et du « comment » au phénomène d'appropriation. Au contraire, des réponses à ces questions peuvent être adressées par le niveau supérieur. En effet, le niveau comportemental va fournir une information plus approfondie sur la genèse de cette appropriation. Ici, il va s'agir d'une analyse beaucoup plus fine de la performance humaine, c'est-à-dire en se basant davantage sur les patterns d'exécution du mouvement ou de représentation spatiale du système homme-machine. Par la suite, ces données sont interprétées neuroscientifiquement en s'appuyant sur les modèles comportementaux humains présents dans la littérature.

En effet, les recherches en neurosciences nous permettent déjà de dégager un certain nombre de « lois biologiques » relativement fiables et reproductibles. Ces lois constituent ainsi des marqueurs robustes et mathématiquement quantifiables sur la nature profonde du fonctionnement de l'Être humain. Nombre d'entre-elles ont également le mérite de résister aux éventuelles variabilités dues aux différentes classes d'âges, au sexe, à la morphologie... des sujets testés de même, parfois, qu'à l'organe effecteur considéré. A titre d'exemple, on peut citer la « loi de puissance » (Lacquaniti *et al.*, 1983) qui fournit une relation mathématique entre la géométrie et la cinématique du mouvement. La robustesse de cette loi est telle qu'elle s'avère vérifiée que le sujet soit un adulte ou un enfant (Viviani & Schneider, 1991) et, également, que le mouvement soit initié par les membres thoraciques ou pelviens (Vieilledent *et al.*, 2001). Au contraire, si l'on s'intéresse à la performance brute (temps, précision...) de l'exécution du mouvement, on ne retrouvera pas cette reproductibilité de la performance comportementale observée à travers les âges ou les effecteurs.

Cette différence fondamentale entre le niveau d'analyse de la performance brute et le niveau d'analyse relevant des processus comportementaux, à travers le cas précis de la « loi de puissance », met clairement en évidence l'intérêt d'utiliser les « lois biologiques » à des fins d'évaluation ergonomique. En effet, selon l'approche RV, l'appropriation se définit comme une incarnation, c'est-à-dire que le sujet ne doit plus faire qu'un avec le système. Or, une machine aussi perfectionnée soit-elle ne peut assurer à son utilisateur une aisance sensori-motrice comparable au corps propre de l'individu en question. Ainsi, il est vain de chercher dans la performance brute un marqueur fiable qui puisse nous informer sur une éventuelle appropriation de la machine, puisque les larges différences d'efficacité enregistrées systématiquement entre ces deux entités « Homme » versus « Homme-Machine », nous empêcherons de conclure à une quelconque incarnation. Au contraire, la recherche de possibles reproductions de « lois humaines » au sein de l'entité hybride « homme-machine » constitue, en ce quelle recouvre d'intégration de l'artefact au niveau des schèmes sensori-moteurs de l'opérateur, le seul véritable indice révélateur ou non d'une appropriation du système. Cela nous est suggéré ici à travers la « loi de puissance », mais nous aurions tout aussi bien pu citer la « loi de Fitts » déjà utilisée pour évaluer l'ergonomie de manipulateurs robotiques (Draper *et al.*, 1999).

## V. Conception ergonomique

Les considérations de la section IV nous révèlent que la nature de l'adaptation de l'homme à la machine est fortement dépendante du degré de différence de fonctionnement entre ces deux entités. Ainsi, nous avons vu qu'un fonctionnement peu différent entre opérateur et machine s'apparente au cas de figure de l'individu face à une situation relativement peu nouvelle. Dans cette condition, l'adaptation s'effectue par processus à dominante d'assimilation, c'est-à-dire par généralisation des schèmes initiaux pertinents pour la conduite de la situation, de la machine... Inversement, en cas de fonctionnement très différent, l'individu se retrouve dans une situation qui lui est tout à fait étrangère. C'est donc le processus d'accommodation qui devient, pour un temps, dominant (figure 11). Il aboutit à la transformation et réorganisation de schèmes disponibles, qui produisent progressivement de nouvelles compositions de schèmes permettant la maîtrise renouvelée et reproductible de la nouvelle classe de situations. Il ressort de ces observations que, la question de l'écart entre les schèmes et représentations initiales des sujets et les schèmes et représentations nécessaires pour contrôler la machine est cruciale sur le plan de la conception ergonomique des systèmes. Dans ce cadre-là, deux options opposées sont envisageables.



**Figure 11 :** Application du modèle piagétien d'adaptation à la Coopération Homme-Machine.

La première est de chercher à réduire l'écart entre les schèmes spontanés de l'opérateur et ceux appropriés à la commande de la machine. Cette voie consiste à considérer l'instrument comme un prolongement des fonctions motrices du sujet. Ainsi, lorsqu'une telle

projection est pertinente, le sujet va tendre à attribuer ses propres caractéristiques et propriétés à la machine (Gaillard, 1993 ; Léonard & Rabardel, 1984). Suivant cette approche, qu'on peut qualifier d'anthropomorphique, il s'agit donc de chercher à construire des instruments directement appropriables par un processus à dominante d'assimilation. Cependant, dans de nombreuses situations, une telle compatibilité homme-machine n'est ni possible d'emblée ni facilement atteignable. C'est pourquoi, la seconde option vise à prendre acte de l'écart, dans la mesure où il est considéré comme non significativement réductible. Dès lors, la conception ergonomique cherchera à mettre en évidence cet écart afin d'en faciliter la conceptualisation par le sujet. Par exemple, dans les situations de programmation par points, Poyet (1989) fait l'hypothèse que les dispositifs suggérant le moins de projection corporelle seraient les moins problématiques pour les opérateurs, car ils les amèneraient à penser en terme de trajectoires par points, c'est-à-dire suivant le fonctionnement même de la machine. Notre dispositif présentant potentiellement des caractéristiques (bras anthropomorphe, contrôle en coordonnées cartésiennes, vision mobile...) ne semblant pas, à priori, préjudiciables à une projection de l'opérateur dans le système, c'est vers le choix anthropomorphique que cette étude s'est naturellement tournée.

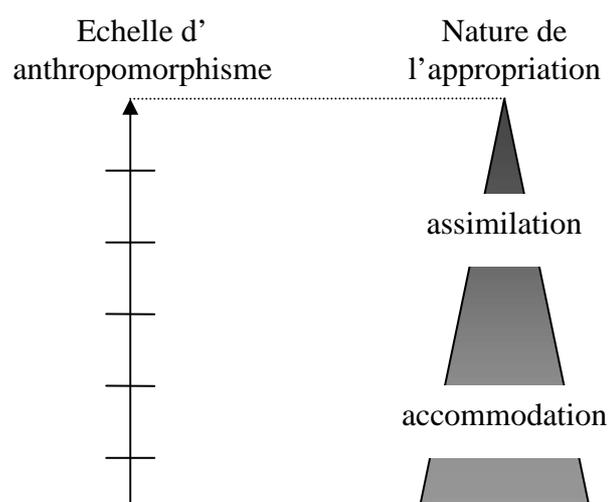
### **V.1. Approche anthropomorphique**

Dans la plupart des situations explorées par les recherches (Laborde & Mejias, 1985 ; Mendelsohn, 1986), les sujets, au moins en phase initiale, tendent à attribuer aux objets sur lesquels ils agissent et aux artefacts qui sont les moyens de l'action, des caractéristiques, propriétés... propres au sujet lui-même. Ainsi, les mouvements des artefacts sont interprétés par le sujet dans les termes de la motricité propre. L'objet sur lequel il agit avec l'instrument est conçu dans les mêmes termes que l'objet de l'activité sans instrument. Il attribue donc ses actions à l'instrument. De plus, Mendelsohn (1986) remarque que la construction de représentations qu'on peut qualifier d'anthropomorphiques de la machine, est encouragée par la parenté entre les caractéristiques de la machine et le fonctionnement ou les schèmes familiers des sujets. En outre, cette parenté présente la faculté de faciliter pour l'opérateur une première entrée dans le système.

Lorsqu'une telle projection est pertinente, elle s'inscrit dans un processus d'assimilation aux schèmes d'action et de cognition du sujet. Ainsi, le dispositif de commande de télémanipulateur présenté par Gaillard (1993) facilite une telle assimilation. Dans ce système, le repère de commande cartésien du robot est isomorphe au repère corporel

de l'opérateur. En ce sens, on peut dire qu'il est égo-centré. L'opérateur peut donc projeter son schéma corporel dans l'espace de travail du robot. Il lui est possible de générer un schéma moteur directionnel adéquat. Les réajustements sont peu nombreux et la situation permet le transfert de la directionnalité du mouvement avec une économie d'apprentissage. Ainsi, dès le premier essai, l'opérateur procède à un contrôle interne du mouvement (Pew, 1974 ; Schmidt, 1975) et à une planification efficace de celui-ci par isomorphisme spatial homme-machine. De la même façon, en robotique pédagogique, certains sujets parviennent à se représenter et contrôler un robot sur la base d'une projection anthropomorphique de leur corps et de leur motricité propre.

Un phénomène identique d'assimilation trouve également des exemples en robotique industrielle. Dans une étude portant sur les modes de programmation de robot, Poyet (1993) met en évidence que les sujets cherchent à se situer, en pensée, au-dessus ou au-dessous du robot, pour faire coïncider leurs repères spatiaux propres (égo-centrés) avec les repères spatiaux de la machine. C'est grâce à la compatibilité entre les propriétés du dispositif et les schèmes et représentations initiales du sujet que cette assimilation peut réussir, celle-ci n'étant évidemment pas « donnée » mais construite par l'activité du sujet. Au contraire, moins cette compatibilité est présente, plus l'utilisateur doit s'accommoder à la machine en tant qu'objet technique. Ceci permet de dresser une « échelle d'anthropomorphisme » indiquant le processus d'appropriation engagé de manière dominante en fonction du degré d'isomorphisme entre l'homme et la machine (figure 12).



**Figure 12 :** Modèle suggérant, à priori, le processus d'appropriation devant être majoritairement mis en jeu selon l'isomorphie homme/machine.

Etant donné les caractéristiques intrinsèques au système de téléopération utilisé dans cette étude, il est possible d'établir à quel niveau de cette échelle ses composantes principales vont se situer. Tout d'abord, en ce qui concerne l'interface de contrôle, celle-ci est matérialisée par un clavier d'ordinateur. Ce type de commande, qu'on qualifie de « boîte à boutons », représente une logique de fonctionnement fort différente de la commande naturelle des organes effecteurs de l'homme. Ainsi, on peut présager que ce nouveau genre de contrôle va nécessiter que l'opérateur accommode ses schèmes préexistants pour parvenir à une appropriation de cette composante du système. En revanche, au niveau du robot à proprement parlé, le processus d'adaptation majoritairement mis en jeu semblerait, à priori, différent. En effet, le bras manipulateur présente des caractéristiques morpho-fonctionnelles relativement proches de celles de l'homme, en particulier il dispose d'un nombre de degrés de liberté équivalent à celui-ci. De même, la plate-forme mobile permet une dynamique de déplacement qui tend à se rapprocher de celle de l'humain. En définitive, il apparaît donc que notre dispositif expérimental nécessitera bien de la part de l'opérateur d'avoir recours aux deux mécanismes d'un phénomène d'adaptation, à savoir un processus à dominante d'accommodation pour s'adapter à l'interface et un processus à dominante d'assimilation pour s'approprier l'engin de téléopération proprement dit. Du moins, pour ce qui est de cette dernière partie du système, il est raisonnable de penser qu'elle ne constitue pas un obstacle potentiel à l'établissement d'un tel processus.

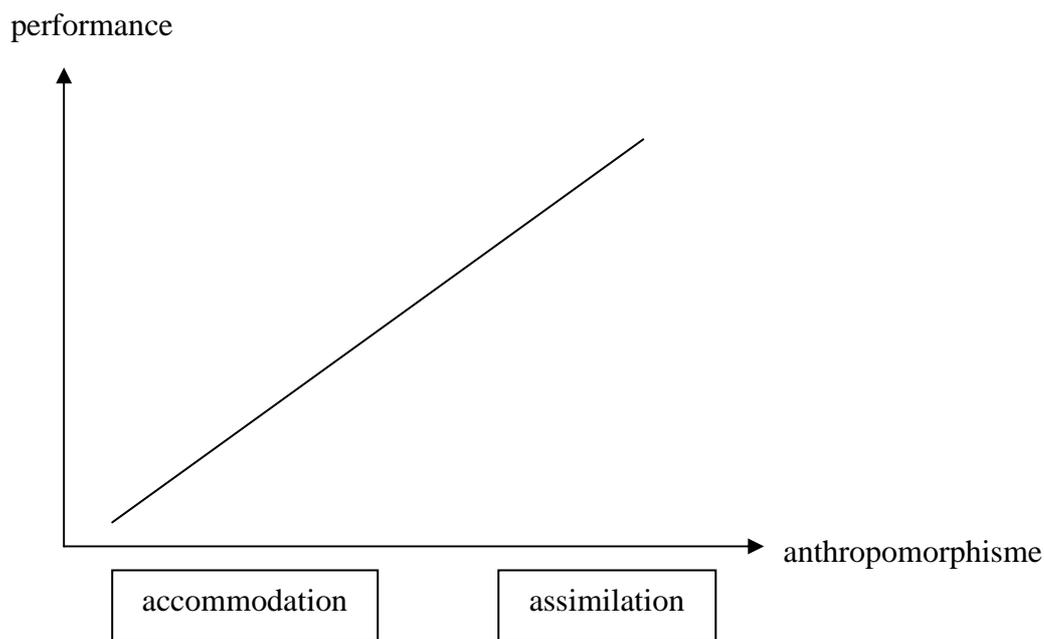
En effet, il ne s'agit ici que de l'élaboration de mécanismes d'adaptation potentiellement possibles relativement aux caractéristiques morpho-fonctionnelles intrinsèquement liées au système technologique employé. Cependant, la manipulation de certains éléments du dispositif à un niveau structurel ou/et fonctionnel peut modifier le type de processus majoritairement mis en jeu suivant la composante du système considérée. C'est, d'ailleurs, en cela que réside tout l'intérêt de notre approche anthropomorphique. Celle-ci postule que lorsque l'opérateur retrouve dans l'architecture physique ou fonctionnelle de la machine des propriétés de type humaine, il tendra à s'y adapter par un processus à dominance d'assimilation, favorable à une appropriation rapide du dispositif. En pratique, cela va consister à manipuler deux natures de variables du système. Une variable relevant de la relation géométrique entre des éléments pertinents du robot, eu égard au modèle humain, tel que la position du capteur visuel par rapport à l'organe effecteur. Cet aspect est nommé la composante structurale ou morphologique de l'approche anthropomorphique. La seconde variable vise à manipuler le mode de fonctionnement du robot, toujours par rapport à la

référence humaine. Dans ce cas, l'objectif est d'évaluer le réel avantage d'implémenter des stratégies sensori-motrices de type humaines sur la machine. Cette dernière dimension de la démarche expérimentale anthropomorphique est qualifiée d'aspect fonctionnel ou comportemental. Dans cette étude, notre analyse de l'approche anthropomorphique portera sur l'une et l'autre de ces deux variables.

## **V.2. Application et hypothèse**

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la Coopération Homme-Machine entre un téléopérateur et un bras manipulateur monté sur une plate-forme mobile, en favorisant l'appropriation de la machine par son utilisateur. La stratégie utilisée pour parvenir à ce résultat est une approche anthropomorphique. Ainsi, notre option est de réduire l'écart entre les schèmes naturels, spontanés, de l'opérateur et ceux nécessaires au contrôle du télérobot. Concrètement, il va s'agir d'architecturer le dispositif suivant un modèle de type humain. Cette configuration portera tant sur le plan morphologique (positionnement des organes récepteurs par rapport aux organes effecteurs) que fonctionnel (implémentation de comportements sensorimoteurs d'inspiration humaine).

L'idée est basée sur le fait que plus le système de téléopération présentera une organisation de type humain, plus on doit favoriser une appropriation par processus à dominante d'assimilation. Si nous privilégions ce processus, c'est parce qu'il implique un plus faible coût d'apprentissage et une meilleure adéquation avec les représentations mentales et schèmes d'action de l'homme (Rabardel, 1995). D'où, l'hypothèse générale développée dans cette étude est de considérer que plus le niveau d'appropriation du robot sera important plus la performance de l'opérateur devrait être élevée. Aussi, du fait de la dimension continue et non discrétisée de cette conjecture, cette dernière sera testée à partir de conditions expérimentales basées sur une échelle croissante d'anthropomorphie. Ce qui permet de compléter la figure précédente en mettant en relation la corrélation positive que nous postulons entre l'anthropomorphisme et la performance (figure 13).



**Figure 13 :** Corrélation postulée entre anthropomorphisme et performance.

## VI. Organisation générale des chapitres

L'architecture générale de cette thèse est organisée en deux grands chapitres. Le premier représente une application de l'approche *anthropomorphique* dans sa composante purement structurale. Sur ce plan, le chapitre va s'attacher à deux questions intéressantes la coopération homme-machine. Tout d'abord, il s'agira de dégager des preuves scientifiques permettant d'affirmer ou d'infirmer l'élaboration d'une relation d'appropriation d'un robot par un opérateur placé en condition de téléopération. Puis, dans le prolongement de cette problématique, nous tenterons d'évaluer le degré de fidélité à respecter par rapport aux caractéristiques morphologiques humaines pour parvenir à une éventuelle appropriation. Cet aspect structural ne sera développé qu'au niveau de la fonction de préhension, c'est-à-dire qu'elle ne concernera que la partie bras manipulateur au sein de l'ensemble du système ARPH.

Par la suite, le second chapitre visera à savoir si la validité de l'approche anthropomorphique est généralisable à une implémentation non plus seulement à un niveau morphologique, mais également sur un plan morpho-fonctionnel. Là encore, nous évaluerons si l'implantation d'un comportement d'inspiration humaine dans le mode de fonctionnement du robot a pour effet de réduire la situation de désincarnation du téléopérateur. Dans un

second temps, nous quantifierons l'influence de la fidélité de la copie comportementale sur le niveau d'identification de l'homme à la machine. Cette dimension morpho-fonctionnelle n'est étudiée, quant à elle, qu'au niveau de la navigation. C'est essentiellement à cause de contraintes techniques que nous avons opté pour ce choix de répartition de l'étude de la préhension sur un plan morphologique et du déplacement sur un plan morpho-fonctionnel. En effet, la saisie s'opère via un robot manipulateur, le bras MANUS, qui est un système commercial et donc relativement fermé. Au contraire, la plate-forme mobile étant développée par le laboratoire, il a été beaucoup plus facile d'intervenir directement sur son mode de fonctionnement.

L'organisation interne des chapitres est effectuée comme suit. Le premier chapitre comprend sept grandes parties. Les trois premières précisent respectivement le cadre général dans lequel s'inscrit l'étude, l'interrogation posée et le matériel utilisé. Puis, se succèdent deux expériences identifiant la représentation que l'opérateur se forge du bras télémanipulateur et ce, en fonction de la configuration du système robotique. L'avant-dernière grande partie vise à aborder la relation s'instaurant entre l'homme et la machine, non plus seulement sur un plan perceptif mais sur celui de l'acte moteur, seule véritable dimension permettant d'affirmer si l'opérateur est réellement parvenu à une appropriation sensori-motrice du système. L'ultime partie, présente dans les deux chapitres, est une conclusion qui porte sur l'ensemble des expériences. Le second chapitre, quant à lui, est composé de cinq parties. On y trouve, comme précédemment le cadre de l'étude ainsi que le matériel expérimental, plus deux expériences successives pour lesquelles sont développés des mécanismes visuo-moteurs de plus en plus proche de leur modèle humain.

Enfin, le contenu de chaque chapitre est organisé comme un article neuroscientifique. D'abord, une présentation qui introduit le thème de l'expérience. S'en suit le protocole expérimental où est détaillée la population testée, les conditions et les procédures de la manipulation. Les données sont traitées dans la section, à part, suivante. Pour terminer, les résultats sont discutés à la lumière des acquis neuroscientifiques. L'ensemble de ce travail est achevé par un chapitre conclusif, où est dressé une synthèse de notre approche anthropomorphique du concept d'appropriation et des perspectives qu'elle engendre pour d'autres applications techniques.

# **Aspect morphologique : positionnement du référentiel visuel par rapport à l'organe préhenseur**

## RESUME

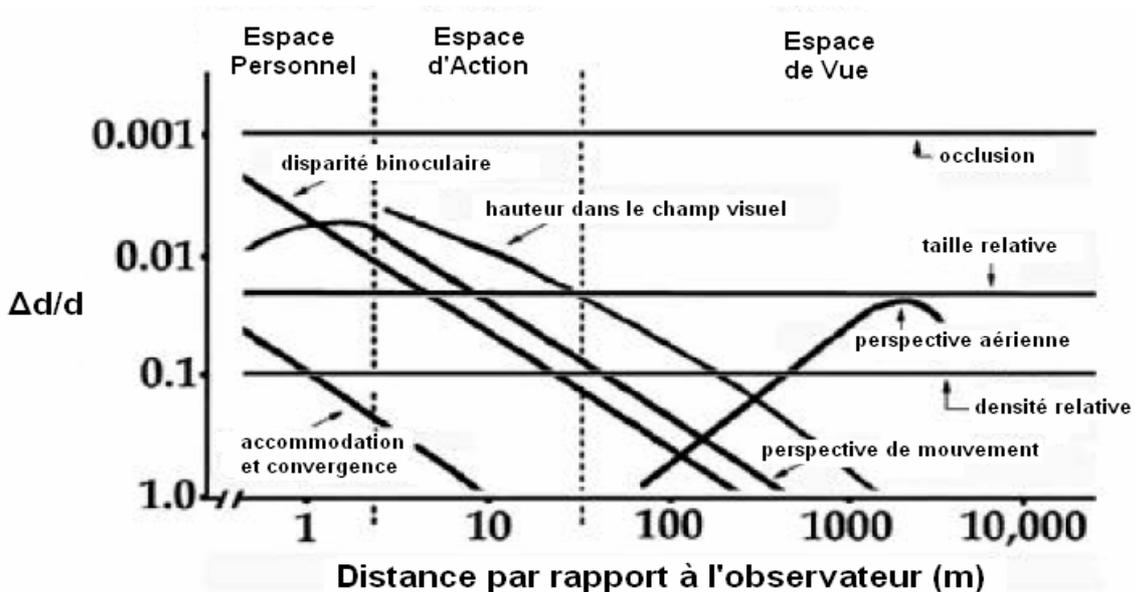
Lorsqu'un opérateur humain contrôle à distance un bras robotique configuré selon une relation spatiale caméra/bras de type anthropomorphe, l'analyse de la représentation mentale que l'individu se crée de ce système révèle des signes évidents d'appropriation de la machine par le sujet. Dans cette situation, l'opérateur tend à transposer les propriétés de son propre corps sur la perception qu'il a du pouvoir d'extension du bras télérobotique, lesquelles transpositions peuvent diverger des capacités réelles du robot. Aussi, une seconde expérience montre que le processus d'appropriation majoritairement mis en jeu (assimilation vs accommodation) paraît directement lié à la nature plus ou moins anthropomorphique de l'architecture structurale du dispositif caméra/bras. Ainsi, plus la position de la caméra par rapport au robot s'éloigne d'une configuration s'apparentant au modèle topologique de la relation œil/bras de l'homme, moins l'atteinte de l'appropriation semble s'effectuer par processus assimilateurs. Afin de savoir s'il est préférable de concevoir un système de télémanipulation privilégiant une appropriation à dominante assimilatrice versus accommodatrice, une analyse détaillée du contrôle moteur du télérobot a été effectuée sur les mêmes configurations que celle de l'expérience deux. Cette évaluation, en plus de révéler sur le plan de l'action que c'est en condition anthropomorphique que le degré d'appropriation est le plus important, indique que cette configuration est celle qui offre l'efficacité la plus élevée à l'individu. En définitive, ces travaux montrent que c'est en concevant le dispositif de télémanipulation du bras manipulateur MANUS selon une architecture structurale de type anthropomorphe que l'opérateur sera le plus performant.

## I. Cadre d'étude

### I.1. Organisation de l'espace qui nous entoure

#### I.1.1. Point de vue psychophysique

Lorsqu'on désire concevoir un système de téléopération adapté aux capacités perceptives humaines, on doit tout d'abord comprendre comment l'homme perçoit l'espace dans les conditions naturelles. En premier lieu, il apparaît que l'archétype morphologique de l'être humain va fortement conditionner la manière dont celui-ci appréhende le monde qui l'entoure. En particulier, les caractéristiques des capteurs sensoriels ainsi que la position qu'ils occupent par rapport aux organes effecteurs contraignent le système nerveux à traiter l'environnement d'une manière non homogène. C'est au niveau de la modalité visuelle que cette constatation est la plus flagrante. En effet, en fonction de la distance entre un observateur et l'objet observé, il est possible de segmenter l'espace en différentes couches sur la base du spectre d'action des divers indices psychophysiques utilisés par le système visuel (figure 12). Cela amène à postuler l'existence de trois principales classes d'espace sphériques et concentriques, gravitant autour de l'observateur : l'espace personnel, l'espace d'action et l'espace de vue.



**Figure 12 :** Seuils de profondeur ordinaire discriminable en fonction du logarithme de la distance par rapport à l'observateur, de 0,5 à 10000 m, pour neuf sources d'information sur les couches spatiales (adapté de Cutting, 1997).

L'*espace personnel* est la zone de l'espace qui s'étend depuis le pourtour immédiat de l'observateur, jusqu'à une limite située légèrement au-delà de l'extension maximale du bras (Hall, 1966 ; Sommer, 1969). Cet espace représente donc un rayon d'une longueur d'environ 1,5 mètres, ce qui correspond précisément à la zone pour laquelle un individu peut agir sans avoir à engendrer une activité locomotrice. D'où, dans cette région, l'humain ne profite pas classiquement des informations de perspective de mouvement<sup>5</sup>, puisque celles-ci sont générées par le déplacement de l'observateur. En revanche, il peut bénéficier d'indices de mouvement assez utiles qui sont ceux produits par les déplacements de la tête et les gestes de manipulation des objets (parallaxe de mouvement). Néanmoins, d'une manière générale, les informations de mouvement sont relativement peu utilisées dans cette partie de l'espace. En fait, on dénombre cinq sources d'information majoritairement utilisées par le système visuel. Celles-ci sont par ordre de dominance : l'occlusion, la disparité rétinienne, la taille relative, la convergence et l'accommodation.

Il y a occlusion lorsqu'un objet cache, ou cache partiellement, la vue d'un autre. D'un point de vue artistique, elle est souvent la seule information utilisée pour transmettre la notion de profondeur (Biederman, 1948). Aussi, on peut raisonnablement la considérer comme le premier indice découvert et utilisé pour dépeindre les relations spatiales de profondeur. Cependant, ce n'est qu'un indice ordinal, c'est-à-dire qu'il donne une information sur l'ordre de profondeur mais pas sur la valeur de celle-ci. Ainsi, un observateur sait quel objet est devant quel autre, mais ne connaît pas la distance qui les sépare. Malgré tout, la capacité d'un tel indice est remarquable. Il a une fiabilité constante quelle que soit la distance et son seuil de discrimination excède toutes les autres sources d'information (figure 12).

La disparité rétinienne, ou disparité binoculaire, est la différence de position relative d'un objet projeté sur la rétine des deux yeux. Lorsque les disparités ne sont pas trop élevées elles produisent de la stéréoscopie, c'est-à-dire l'impression d'un espace en relief. Aucune autre source d'information, excepté peut-être le mouvement (Roger & Graham, 1979), ne peut fournir une telle intensité de sensation de profondeur. Enfin, cet indice a la propriété de donner une information absolue sur des distances situées à proximité de l'observateur (Landy *et al.*, 1991 et 1995).

La troisième source d'information utilisée dans l'espace personnel, lorsqu'elle est disponible, est l'indice de la taille relative. Celle-ci consiste en la mesure de la taille de la

---

<sup>5</sup> La perspective de mouvement fait référence au mouvement relatif de la projection d'objets statiques causé par le déplacement de l'observateur (Helmholtz, 1867 ; Gibson, 1950). Ferris (1972) et Johansson (1973) ont démontré qu'à travers cet indice, les individus sont capables d'avoir un jugement assez précis des distances absolues supérieures à environ 5 mètres.

projection rétinienne d'objets qui sont physiquement identiques en taille, mais situés à des distances différentes. A la différence de l'occlusion, la taille relative fournit davantage qu'une information ordinale, puisqu'elle donne une échelle de valeur sur la profondeur du champ. En se basant sur l'hypothèse d'une similarité de taille physique entre les objets présentant une forme identique, leur rapport de tailles rétinienne est directement proportionnel au rapport inverse de leurs distances à l'observateur. Aussi, comme montré sur la figure 12, cet indice reste fiable sur toute l'étendue des distances visibles, fournissant un seuil de discrimination de la profondeur aux alentours de 3%.

Dans cette région de l'espace les ultimes informations visuelles relativement utilisées sont la convergence et l'accommodation. La convergence est mesurée par l'angle formé par l'axe optique de chacun des deux yeux. Quand cet angle est grand, les deux yeux sont inclinés en dedans comme s'ils fixaient un point très près du nez. Au contraire, lorsque cet angle tend vers 0°, les yeux sont quasiment alignés parallèlement comme s'ils regardaient à l'horizon. L'accommodation, quant à elle, correspond au changement de forme du cristallin, permettant de fixer indifféremment des points proches ou éloignés afin de renvoyer une image rétinienne toujours nette de l'objet regardé. L'accommodation n'est pas réellement un très bon indicateur de distance puisque, que ce soit les objets situés en avant ou ceux en arrière du point de fixation ils présentent tous un même rendu de flou. En revanche, à travers des fixations à différentes profondeurs, elle a potentiellement la capacité de fournir une telle information. En cela, convergence et accommodation sont unis de manière réciproque<sup>6</sup> (Fincham & Walton, 1957 ; Kersten & Legge, 1983 ; Morgan, 1968).

Dans la région circulaire située juste au-delà de l'espace personnel, on trouve l'*espace d'action*. C'est un espace relationnel au niveau duquel on se déplace assez rapidement, où l'on communique verbalement avec autrui et l'on peut s'échanger objets ou autres projectiles. Cette région est également servie par de nombreuses sources d'information. Elles sont aussi au nombre de cinq : l'occlusion, la hauteur dans le champ visuel, la disparité binoculaire, la perspective de mouvement (qui est ici d'origine locomotrice) et la taille relative. Ainsi, seuls les indices de convergence et d'accommodation ont disparus, alors qu'une nouvelle information de hauteur dans l'image apparaît.

---

<sup>6</sup> Bien évidemment, la convergence est également reliée à la stéréoscopie, et lorsque le système de vergence fonctionne mal cela provoque des difficultés voire des impossibilités à fixer la même partie d'un objet avec les deux yeux, dont il résulte des strabismes.

La hauteur dans le champ visuel mesure les relations de la projection rétinienne de la base des objets de l'environnement tridimensionnel de l'observateur. Une telle information s'étend depuis le bas du champ visuel jusqu'en haut, fournissant ainsi un assez bon indice ordinal sur la distance entre les différents éléments de la scène et l'observateur (Dunn *et al.*, 1965). Cependant, cette estimation nécessite un certain nombre de postulats qui ne sont pas toujours respectés. Par exemple, elle suppose une opacité de la surface de support, la gravité et donc que la base de tous les objets soit ancrée au sol, que la surface de support soit plane... Egalement, la figure 12 montre que l'utilité de cet indice diminue avec la distance. Ce graphique fait l'hypothèse qu'il s'agit d'un individu adulte en station debout sur un sol plan. Etant donné que la hauteur de ses yeux est à peu près à 1,6 mètres, les bases plus proches qu'1,6 mètres ne sont pas prises en compte, ce qui explique que la fonction soit tronquée pour les distances inférieures.

En ce qui concerne les autres sources d'information, nous constatons comme précédemment que l'efficacité des indices d'occlusion et de taille relative reste constante avec le logarithme de la distance à l'observateur. En revanche, les trois autres sources déclinent de manière régulière avec cette échelle d'espace. Du fait qu'elle soit tronquée du côté des petites distances, la fonction de hauteur dans le champ visuel permet de délimiter la frontière proximale de l'espace d'action à la valeur d'environ 1,6 mètres. De même, étant donné que l'utilité de la disparité binoculaire et de la perspective de mouvement diminue jusqu'à un seuil de discriminabilité de 10% aux alentours des 30 mètres (cf. figure 12), cette distance peut être considérée comme la limite distale de la seconde couche spatiale.

L'*espace de vue* prend donc place sur les distances supérieures à 30 mètres. Dans cette région, relativement peu de changements vont se manifester pour l'observateur mobile, excepté au niveau de la dynamique temporelle de ceux-ci. Par exemple, le mouvement perçu d'un objet est considérablement moins saillant que son déplacement réel, et la capacité à percevoir la profondeur à partir des deux yeux est aussi grandement diminuée. Les seules sources d'information encore effectives sont celles traditionnellement appelées « indices picturaux ». Il y en a quatre : l'occlusion, la hauteur dans le champ visuel, la taille relative et la perspective aérienne.

Puisque l'efficacité de la disparité binoculaire et de la perspective de mouvement ont diminué substantiellement, Cutting et Vishton (1995) désignent cette espace comme la couche de la vue, une région pour laquelle la perception est peu sensible aux mouvements de l'observateur. Pour autant, même si ce dernier va disposer d'une quantité bien moindre

d'indices visuels, il peut continuer à distinguer la profondeur des objets à cette distance. Cependant, cette perception n'est plus réalisée qu'à partir de sources d'information monoculaires et statiques qui sont celles typiquement disponibles pour un piéton regardant au loin.

### I.1.2. Point de vue neuropsychologique

La segmentation de l'espace entourant les individus n'a pas été uniquement mise en évidence par des études psychophysiques. Ainsi, d'autres domaines des neurosciences ont montré que le système visuel divise l'espace en secteurs égocentriques distincts, sur la base d'une dichotomie entre les régions proches et celles éloignées du corps. Les distinctions les plus évidentes entre représentations de l'espace proche et de l'espace lointain dans le cerveau viennent des travaux sur les sujets présentant un désordre neuropsychologique connu sous le nom de *négligence*. Dans la majorité des cas, les lésions touchent le cortex pariétal inférieur droit, et plus spécifiquement le gyrus supramarginal, mais le désordre peut également provenir d'un dommage au niveau du cortex moteur du lobe frontal (Heilman *et al.*, 1983 ; Vallar & Perani, 1986 ; Husain & Kennard, 1996).

Dans les formes les plus ordinaires de négligence, les sujets ignorent tout un côté, ou hémichamp<sup>7</sup>, de l'espace qui les entoure, et plus généralement le côté gauche (Jeannerod, 1987 ; Robertson & Marshall, 1993 ; Halligan & Marshall, 1994 ; Rafal, 1994). Par exemple, si on leur demande d'effectuer une tâche de bissection de lignes horizontales, ils vont pointer incorrectement à la droite du point central, négligeant ainsi le côté gauche de la ligne. Cependant, de récentes études ont montré que la négligence ne se résume pas à un désordre monolithique mais, au contraire, peut se fractionner en une multitude de troubles touchant les capacités de représentation spatiale du malade (Bisiach, 1997 ; Vallar, 1998). Un des types de négligence les plus manifestes concerne la dichotomie entre espace proximal et distal. De nombreux sujets démontrent une incapacité à se représenter consciemment le secteur d'espace situé à proximité, alors que d'autres ont des difficultés à se représenter l'espace lointain (Halligan & Marshall, 1991 ; Cowey *et al.*, 1994, 1999 ; Farnè *et al.*, 1999).

En utilisant deux méthodes identiques, deux études différentes ont découvert des sujets cérébrlésés qui exprimaient des types de négligence opposées. Le premier type impliquait une négligence gauche dans l'espace proche mais pas dans le lointain, alors que l'autre

---

<sup>7</sup> Etant donné que la négligence touche généralement un seul hémichamp de l'espace, on emploie de manière indistinctive la terminologie de négligence ou d'héminégligence.

exhibait une négligence dans le distal et pas dans le proximal. La première étude a été effectuée par Halligan et Marshall (1991), et portait sur un seul sujet présentant une large lésion temporopariétale droite. L'expérience consistait à lui faire exécuter une tâche de bissection de ligne dans les conditions suivantes. Premièrement, le sujet bissectait avec un stylo des lignes horizontales de différentes longueurs, qui étaient placées sur tableau vertical à hauteur des yeux et à une distance d'environ 45 cm, c'est-à-dire à portée du bras. Ensuite, une tâche identique de bissection lui était demandée mais, cette fois-ci à l'aide d'un pointeur laser, puisque celle-ci s'effectuait maintenant sur une distance de 244 cm, donc hors de portée du bras. Les données mettent en évidence une déviation du pointage du côté droit dans la première condition et un pointage correct dans la seconde. Ces patterns de résultats suggèrent que ce sujet présente une déficience sélective de la représentation de son secteur spatial proximal gauche.

La seconde étude a été conduite par Cowey *et al.* (1994) et a employé la même procédure expérimentale. Ici, les sujets cérébrolésés testés étaient au nombre de cinq et possédaient tous des lésions de l'hémisphère droit. La seule différence par rapport au protocole de l'étude précédente est que les sujets ont utilisé un pointeur laser dans les deux tâches de bissection de ligne. Les résultats montrent qu'aucun des sujets n'exprime une négligence gauche dans la condition d'espace proximal, pour laquelle les lignes étaient placées à seulement 45 cm devant. En revanche, tous les cinq individus exhibent une négligence gauche significative dans la condition d'espace distal, où les lignes étaient situées à 244 cm. Cela met en évidence que les hémignégligents testés lors de cette expérience ont une incapacité sélective à percevoir et répondre à des stimuli localisés dans leur secteur spatial distal gauche.

Le fait que les deux études décrivent des profils de performance opposés constitue une importante preuve expérimentale en faveur de l'existence de systèmes neuronaux distincts pour la représentation des stimuli proximaux ou de l'*espace péripersonnel*, d'une part, et pour la représentation des stimuli distaux ou de l'*espace extrapersonnel*, d'autre part. Cependant, ces travaux ne fournissent pas d'information quant à savoir si la représentation mentale de la frontière entre les régions proche et éloignée de l'espace est nette ou graduelle. Ce type de question a récemment été investi par Cowey *et al.* (1999), à partir d'un groupe de treize sujets cérébrolésés au niveau de l'hémisphère droit et classifiés comme hémignégligents gauches sur la base du Test Comportemental d'Inattention (Wilson *et al.*, 1987).

Les sujets effectuaient une série de tâche de bissection de ligne avec un pointer laser sur les six distances suivantes : 25, 50, 100, 200, 300 et 400 cm. Huit des sujets présentaient

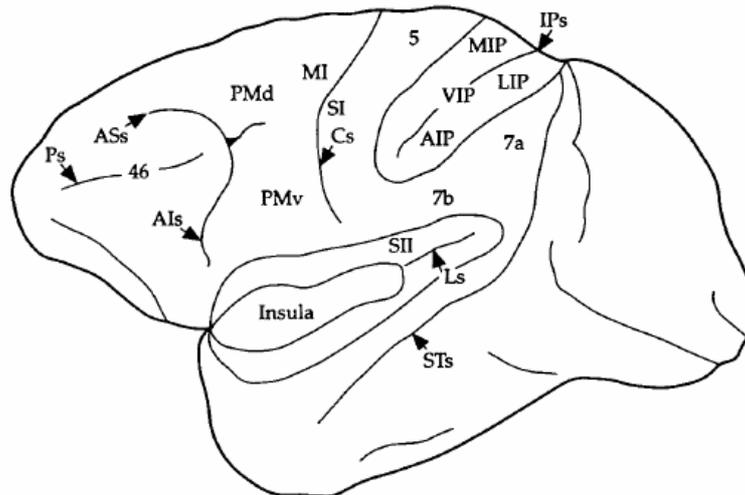
une négligence gauche à toutes les distances, mais les cinq autres exprimaient une nette augmentation de la sévérité de leur négligence pour des distances de plus en plus éloignées. Pour ces cinq sujets, l'erreur de bissection n'était pas significativement différente entre deux distances consécutives, alors qu'elle était significativement plus mauvaise entre la distance la plus éloignée (400 cm) et les trois plus proches (25, 50 et 100). Ces données suggèrent que la frontière entre le secteur proche et éloigné de l'espace ne peut être représentée comme limite stricte, mais plutôt comme un changement continu qui prend place sur une zone correspondant grossièrement à la longueur d'extension maximale du bras. Ainsi, un tel résultat est bien compatible avec celui obtenu en psychophysique quant à la délimitation entre *espace personnel* et *espace d'action*.

Bien que les travaux menés par Halligan et Marshall, et Cowey *et al.* fournissent de fortes évidences psychologiques sur une représentation mentale séparée entre espace proximal et distal, les sites de lésions des sujets cérébrolésés sont trop variables pour en inférer les substrats anatomiques qui sous-tendent chacun des deux systèmes. Le sujet de l'étude de Halligan et Marshall présentait une très large lésion de l'hémisphère droit qui comprenait le cortex pariétal inférieur, le cortex temporal latéral et médian et une partie du lobe frontal inférieur. Les sujets des deux études de Cowey *et al.* présentaient quant à eux des lésions de l'hémisphère droit relativement disparates et étendues sur les lobes frontal, pariétal et temporal. En dépit de ces limitations, de nombreuses études en neurophysiologie, et plus particulièrement en neurophysiologie animale, permettent une identification des divers substrats neuronaux sous-tendant les principales voies de représentation de l'espace proximal et distal.

### I.1.3. Point de vue neurophysiologique

Nous ne disposons que de très peu de connaissance sur l'architecture des systèmes cérébraux de représentation de l'espace proche et lointain de l'homme. Cependant, les nombreuses études neurophysiologiques effectuées sur le macaque nous laissent entrevoir les grandes lignes d'organisation de ces deux systèmes chez les primates. Avant tout, il est possible que la représentation distinctive entre secteur proximal et distal de l'espace est dérivée en partie d'une représentation initiale indifférenciée de l'environnement spatial qui est ancré sur des coordonnées centrées sur la tête (Rizzolatti *et al.*, 1997). Cette représentation pourrait résider dans l'aire PO (le bord antérieur du sillon pariéto-occipital). En effet, Galletti *et al.* (1993) ont découvert dans cette aire des neurones répondant à des stimuli visuels dans

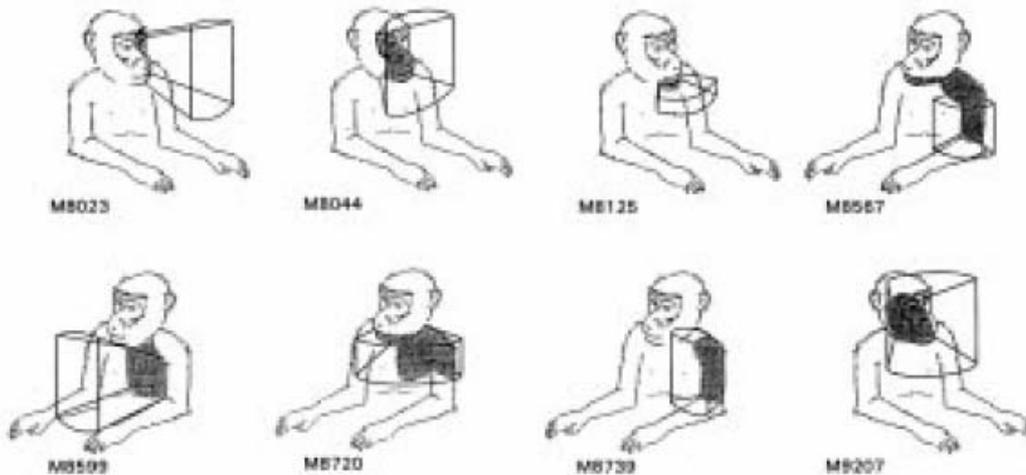
des localisations particulières de l'espace, et dont le champ récepteur ne se déplaçait pas avec les mouvements des yeux mais plutôt avec ceux de la tête. Ainsi, du fait que ces neurones soient basés sur un cadre de référence craniotopique et non rétinotopique, a amené Galletti *et al.* à désigner ces neurones comme codant une « position réelle ». Ces auteurs suggèrent également que ces neurones peuvent fournir une information spatiale aux autres structures corticales, qui ont besoin de cette information pour une représentation seulement du monde visuel proximal ou seulement du distal.



**Figure 13 :** Carte des principales aires pariétales et frontales impliquées dans les systèmes de représentation de l'espace proximal et distal d'un cerveau de singe. Les aires sont vues du côté de l'hémisphère gauche. Les sillons intrapariétal et latéral ont été ouverts pour montrer les aires cachées en dessous. MIP, LIP, VIP et AIP : aires intrapariétales médiane, latérale, ventrale et antérieure. SI et SII : aires somatosensorielles primaire et secondaire. MI : cortex moteur primaire. PMd et PMv : aires prémotrices dorsale et ventrale. Les aires F4 et F5, référencées dans le texte, sont toutes deux localisées dans PMv. ASs et AIs : sillon arqué. Cs : sillon central. STs : sillon temporal supérieur (d'après Jeannerod, 1997).

Un grand nombre d'aires cérébrales contribuent à la représentation de l'espace proche (figure 13), et beaucoup plus de données sont disponibles sur ce système en comparaison avec celui du lointain. En termes computationnels, une fonction importante du système proximal est de transformer une simple représentation de l'espace péripersonnel centrée sur des coordonnées céphaliques en de multiples représentations de l'espace péripersonnel dans des coordonnées spécifiques à chaque partie du corps. Ainsi, ces dernières représentations peuvent être utilisées pour programmer les mouvements, en particulier les mouvements des bras et des mains orientés en direction des objets. Une autre fonction de ce système est de

contrôler visuellement les actions des bras et des mains relativement au visage. D'après ces diverses considérations, le système proximal peut être décomposé en plusieurs différents circuits anatomo-fonctionnels qui s'étendent depuis le lobe pariétal jusqu'au lobe frontal, afin d'assurer : l'atteinte, la saisie et la supervision des mouvements des membres par rapport au visage.



**Figure 14 :** Différents types de champs récepteurs visuels (CRs) et tactiles des neurones bimodaux d’F4. Aires ombrées : CRs tactiles. Solides autours des différentes parties du corps : CRs visuels. Les nombres font références aux neurones particuliers qui ont été enregistrés (d’après Fogassi *et al.*, 1996).

Le *circuit d’atteinte* comprend au moins deux aires pariétales, 7b et MIP (sillon intrapariétal médian), qui reçoivent toutes les deux des voies en provenance de PO (Colby & Duhamel, 1991). Les neurones en 7b s’activent immédiatement avant et durant les mouvements d’atteinte (Hyvarinen & Poranen, 1974 ; Mountcastle, 1975 ; Andersen, 1995). En plus de cela, une grande proportion des neurones de cette aire sont bimodaux, puisqu’ils ne répondent pas seulement à une stimulation cutanée du bras, du buste ou de la tête, mais également à des stimuli visuels dans une région de l’espace différente de la surface corporelle, aux alentours d’une distance de 20 à 100 cm du corps (Graziano & Gross, 1995). En accord avec la sélectivité des neurones 7b pour l’espace proximal, une lésion au niveau de cette aire entraîne une négligence pour l’espace proche et non pour le lointain (Rizzolatti *et al.*, 1983). En ce qui concerne l’aire MIP, bien qu’elle soit originellement une aire somatosensorielle, elle contient aussi des neurones sensibles à la distance visuelle qui répondent plus fortement aux stimuli atteignables par le bras qu’à ceux situés au-delà (Colby & Duhamel, 1996). Les aires 7b et MIP se projettent toutes deux sur l’aire F4 dans le cortex prémoteur dorsal du lobe

frontal. Les neurones de cette aire déchargent durant le mouvement d'atteinte (Gentilucci & Rizzolatti, 1990), et possèdent des propriétés de réponse bimodales, tactiles et visuelles, qui sont ancrées sur des parties spécifiques du corps telles que les bras, le buste ou la face, comme pour les neurones 7b (Graziano & Gross, 1995 ; Fogassi *et al.*, 1996 ; Graziano *et al.*, 1997). Quelques exemples des champs récepteurs de ces neurones sont montrés sur la figure 14. Enfin, il est important de noter que, de la même manière que pour l'aire 7b, une lésion dans F4 cause chez l'animal une héminégligence pour l'espace proximal et pas pour le distal (Rizzolatti *et al.*, 1983).

Tout comme le circuit d'atteinte, le *circuit de saisie* est composé d'une voie pariéto-frontale. L'aire AIP (sillon intrapariétal antérieur) contient des neurones qui sont activés aussi bien durant une action de saisie que durant la fixation passive d'un objet. De plus, ces neurones sont sensibles aux propriétés intrinsèques tridimensionnelles de l'objet tel que sa taille et son orientation, propriétés qui sont fondamentales pour déterminer de quelle manière la main et les doigts doivent se configurer pour interagir avec l'objet en question (Sakata *et al.*, 1992 et 1995). Une inactivation pharmacologique de cette aire entraîne des erreurs dans les mouvements de saisie visuellement guidés, tels qu'une pré-ouverture incorrecte de la main durant la phase d'approche (Gallese *et al.*, 1994). Un désordre identique appelé ataxie optique a été découvert chez des sujets humains présentant des lésions dans la portion supérieure du lobe pariétal (Perenin *et al.*, 1997). Ensuite, AIP se projette vers l'aire F5 dans le cortex prémoteur ventral du lobe frontal, au niveau duquel s'effectue la programmation des mouvements de la main (Matelli *et al.*, 1986). Les propriétés de décharge des neurones de cette aire sont spécialisées dans différents aspects du comportement de saisie, tels que les diverses formes de manipulation d'objets et types de saisie (Rizzolatti *et al.*, 1988).

Le troisième circuit du système de représentation de l'espace proximal semble être impliqué majoritairement dans le contrôle des mouvements de bras et de main s'approchant ou s'éloignant du visage, et en particulier de la bouche. Ainsi, ce circuit devrait jouer un rôle important dans les comportements de nutrition. De la même manière que les deux autres circuits, il constitue une voie pariéto-frontale. L'aire VIP (sillon ventral intrapariétal) reçoit des entrées tout aussi bien en provenance du PO que de différentes aires hautement sensibles au mouvement (plus spécialement les aires MT, médio-temporal, et MST, médio-temporal supérieure). D'ailleurs, ce circuit contient des neurones qui s'activent pour des stimuli qui se déplacent à une certaine vitesse et dans certaines directions de l'espace péripersonnel (Colby & Duhamel, 1991 et 1996 ; Duhamel *et al.*, 1997). Par la suite, VIP se projette sur les aires F4 (région du bras), F5 (régions de la main et de la bouche) dans le cortex prémoteur, et une

partie de l'aire 8 (champs oculaires frontaux) qui est impliquée dans la programmation des mouvements oculaires de poursuite lisse. Il apparaît donc que ce circuit est utile pour coordonner les mouvements des bras, des mains, de la bouche et des yeux dans l'espace proximal de l'individu.

En ce qui concerne l'organisation du système de représentation de l'espace distal, seul quelques études ont été menées et donc, nous ne disposons que de peu de connaissance en la matière. Néanmoins, certains traits de ce système apparaissent comme relativement clairs. Tout comme le système proximal, le système distal est bien adapté pour utiliser des informations visuelles afin de guider le comportement moteur. Cependant, il diffère du proximal par le fait qu'il n'est pas conçu pour contrôler les mouvements des bras, des mains, ou de la tête pour des actions orientées vers des objets de l'espace péripersonnel, mais plutôt conçu pour contrôler les mouvements de saccade oculaire dirigés principalement vers des objets du champ visuel extrapersonnel. Ce système est composé d'aires cérébrales réparties sur le lobe pariétal et frontal. Les aires 7a et LIP (sillon intrapariétal latéral) contiennent des neurones qui répondent principalement aux entrées visuelles, incluant les entrées en provenance de PO (Colby & Duhamel ; 1991). Il est évident que ces neurones représentent la localisation des objets dans un cadre de référence oculocentrique. En d'autres termes, une localisation particulière est codée par rapport à la distance et la direction des mouvements de saccade oculaire nécessaires pour fixer l'endroit en question (Colby & Duhamel, 1991 et 1996 ; Colby *et al.*, 1996).

Les neurones déchargent immédiatement avant la saccade, et continuellement lorsque l'animal conserve en mémoire de travail une représentation d'une localisation spécifique vers laquelle une saccade pourrait être dirigée après qu'un signal en soit donné. De plus, les propriétés de réponse de ces neurones sont fortement modulées par l'attention, ce qui amène Colby et Duhamel (1996) à présupposer que « par essence, l'activité des neurones LIP encode une localisation spatiale attendue ». Enfin, les aires 7a et LIP se projettent sur une partie de l'aire 8 (champs oculaires frontaux) qui est impliquée dans la programmation des mouvements de saccade volontaires de l'œil (Bruce & Golberg, 1985). A noter qu'une lésion dans cette aire induit une négligence plus sévère sur l'espace lointain (au-delà de la limite d'extension maximale du bras) que sur l'espace proche (à porté d'atteinte du bras). Ainsi, ce pattern est exactement à l'opposé d'une lésion des aires 7b et F4 du système spatial proximal (Rizzolatti *et al.*, 1983). Ces résultats confirment bien l'idée que le circuit pariéto-frontal

s'étendant depuis les aires 7a et LIP jusqu'à l'aire 8 est principalement établi pour la recherche et le balayage visuel d'objets situés dans le champ visuel extrapersonnel.

Malgré quelques points de divergences entre les différents domaines neuroscientifiques d'approche de l'organisation de l'espace entourant l'individu, un certain nombre de conclusions générales peuvent être dressées. Tout d'abord, il apparaît que la représentation en multicouches est présente quelle que soit l'approche envisagée. Ainsi, les données psychophysiques distinguent trois espaces, le personnel, celui de l'action et celui de la vue, alors que la neuropsychologie et neurophysiologie en identifient deux, le proche et le lointain. Cet apparent désaccord quant au nombre de couches est à nuancer. En effet, pour autant qu'il y ait une région supplémentaire en psychophysique, les deux plus proximales dans ce domaine ont des délimitations qui correspondent trait pour trait à celles des couches spatiales enregistrées en neuropsychologie et neurophysiologie. D'où, il paraît possible de rapprocher l'espace personnel décrit en psychophysique à celui d'espace proche mis en évidence dans les deux autres domaines, et de même pour l'espace d'action qui fait référence à l'espace lointain.

En réalité, les données psychophysiques ne font que fournir un complément d'information pour les distances supérieures à 30 mètres. Or, pour ces longueurs si l'environnement a encore une certaine réalité visuelle pour l'individu, cela est beaucoup moins vrai en ce qui concerne ses capacités motrices. En effet, à l'échelle de l'homme, des distances excédents 30 mètres ne signifient plus grand-chose en terme de possibilité d'intervention sur le monde (mise à part dans certaines conditions exceptionnelles). Voilà pourquoi, il nous semble possible de s'en tenir à une décomposition de l'espace environnant sur une base majoritairement dichotomique. Aussi, afin de clarifier les différents point de vue énoncés précédemment en des terminologies fédératrices, la couche s'étendant sur la distance correspondant à peu près à la limite d'extension maximale du bras sera appelée espace péricorporel ou péripersonnel<sup>8</sup>, et la couche située au-delà de cette frontière sera nommée espace extracorporel ou extrapersonnel<sup>8</sup>. Si, ainsi, nous pouvons aboutir à un certain consensus quant à la manière dont est architecturé l'espace qui nous entoure, il n'en reste pas moins une question phénoménologique fondamentale. Effectivement, malgré les arguments neuroscientifiques, aucun être humain n'a la sensation de vivre dans un monde segmenté. D'où la question de savoir comment l'individu parvient à donner une cohérence à ces

---

<sup>8</sup> Les deux termes seront employés indifféremment dans la suite du mémoire.

multiples représentations de l'espace afin de reconstruire un monde homogène sur lequel il pourra percevoir et agir de manière adaptée. C'est ce à quoi la section suivante va s'attacher à porter quelques éclaircissements.

## **I.2. Propriétés dynamiques du schéma corporel<sup>9</sup>**

L'obstacle phénoménologique majeur pour pouvoir admettre l'idée que nous évoluons dans un univers segmenté par notre cerveau est celui de la représentation des limites entre les couches. Aussi, pour les chercheurs, une information fondamentale à obtenir après la découverte de systèmes cérébraux distinctifs pour traiter des opérations effectuées dans l'espace péripersonnel et dans l'espace extrapersonnel, est de savoir de quelle nature est la frontière entre ces deux régions de l'environnement. Un début de réponse a déjà été évoqué plus avant par les travaux de Cowey *et al.* (1999). Pour rappeler rapidement les grandes lignes de cette étude, ces auteurs ont cherché à savoir si la limite entre espace proximal et distal est abrupte ou progressive. Pour cela, ils ont demandé à des individus héminégligents dans le secteur distal de bissecter des lignes horizontales sur des distances plus ou moins éloignées. Le résultat obtenu montre une erreur de pointage qui augmente avec la distance, ce qui permet de déduire que la région péripersonnelle est séparée de l'extrapersonnelle par une frontière relativement floue.

Dans le domaine de la neurophysiologie animale, d'autres travaux viennent corroborer cette constatation que la limite entre les régions spatiales n'est pas rigide mais évanescence. Ainsi, il a été mis en évidence que les neurones de l'aire F4 (voie du système péripersonnel) ont un gradient de décharges qui augmente lorsque le stimulus se rapproche dans l'espace proximal et, au contraire, qui décline quand le stimulus s'éloigne de cet espace (Graziano *et al.*, 1997). Egalement, ces mêmes neurones voient augmenter la profondeur de leur champ récepteur lors d'une élévation de la vitesse de déplacement du stimulus en direction du corps (Fogassi *et al.*, 1996).

Du fait de l'élasticité des frontières entre les secteurs environnants, il apparaît donc que les couches spatiales sont assez extensibles les unes par rapport aux autres. C'est, en partie, grâce à cette propriété dynamique de notre représentation de l'espace que ce dernier va

---

<sup>9</sup> La notion de schéma corporel correspond à la conscience totale ou modèle interne que nous avons de notre corps ou de ses parties dans l'espace, en mouvement ou au repos. Il se construit par l'expérience, avec la combinaison des sensations somesthésiques et visuelles. Enfin, cette terminologie inclut à la fois la représentation du corps, l'identification de ses parties et l'utilisation de celles-ci dans l'accomplissement de l'acte moteur.

nous apparaît cohérent quelle que soit la situation rencontrée. Néanmoins, cette flexibilité représentationnelle présente certaines limites. Les principaux travaux qui ont tenté de circonscrire plus précisément la question des propriétés dynamiques du schéma corporel se sont essentiellement focalisés sur l'étude de l'espace péripersonnel entourant la main, et ont majoritairement abordé le problème via un paradigme expérimental d'utilisation d'outils.

Iriki *et al.* (1996) ont montré, chez le singe, que l'activation des cartes spatiales du proche et lointain peut être influencée par l'utilisation d'outils, lorsque l'action effectuée modifie la relation spatiale entre le corps et les objets environnants. Ils ont identifié dans le lobe pariétal du singe des neurones bimodaux encodant le schéma de la main, identiques à ceux étudiés par Graziano et Gross (1995) ainsi que Fogassi *et al.* (1996). Tel qu'il a déjà été mentionné précédemment, ces neurones déchargent aussi bien quand un stimulus tactile est délivré à la main que lorsqu'un objet est visuellement présent à proximité des champs récepteurs tactiles de cette même main. Le caractère le plus original de l'expérience d'Iriki *et al.* (1996) est de montrer que le champ récepteur visuel des neurones bimodaux peut être modifié par l'intentionnalité de l'action. En effet, quand les singes atteignent des objets éloignés à l'aide d'un râteau, le champ récepteur visuel est allongé pour inclure toute la longueur du râteau et ainsi couvrir toute l'expansion de l'espace d'accessibilité. Les auteurs interprètent ces résultats en postulant que durant le mouvement d'atteinte, l'objet est assimilé à la main de l'animal, devenant alors une partie de la représentation mentale de celle-ci (Aglioti *et al.*, 1996 ; Paillard, 1993). L'espace atteignable par le prolongement de la main se voit maintenant étendu, incluant une partie de ce qui était auparavant l'espace lointain, et la relation spatiale entre le corps et les objets est modifiée par l'action d'atteinte avec l'outil. En conséquence de quoi, l'espace distal est remodelé en proximal et les neurones qui s'activaient pour l'espace proche s'activent, également, pour ce qui était précédemment codé comme espace lointain et maintenant atteignable avec le râteau. A noter, enfin, que cette expansion n'est pas irréversible, puisque l'allongement des champs récepteurs finit par se rétracter à sa dimension d'origine après un certain délai de non utilisation de l'outil, preuve supplémentaire de la plasticité de déformation des cartes corticales spatiales.

Cette modulation du codage de l'espace peut aussi être observée chez l'homme. Berti et Frassinetti (2000) ont montré chez une patiente ayant une altération de l'hémisphère droit que, lorsque la représentation cérébrale de l'espace péricorporel était étendue pour inclure l'outil utilisé dans la réalisation d'une action intentionnelle, l'espace anciennement représenté comme lointain était traité comme proche, de la même manière que chez les singes. La patiente « PP » présente une nette négligence dans l'espace proximal pour différentes tâches

comme la lecture ou la bissection de ligne. Cette bissection dans l'espace proximal est affectée par la négligence à la fois par une action de pointage avec l'index de la main droite et, également, quand elle utilise un pointeur laser. Si les lignes sont positionnées loin du corps, la négligence est plus ou moins sévère voire absente lorsque le test emploie un pointeur laser. Ce pattern est très similaire à celui décrit par Halligan et Marshall (1991) et confirme que l'espace qui nous entoure peut directement être affecté par des dommages cérébraux. Cependant, dans l'expérience de Berti et Frassinetti (2000) la patiente devait, en plus, bissecter des lignes dans l'espace distal grâce à un bâton permettant à celle-ci d'atteindre la ligne. Dans cette condition, la négligence apparaît également dans l'espace distal et ce de façon aussi sévère que celle enregistrée dans le secteur proximal. Ce résultat peut s'interpréter à la lumière des données neurophysiologiques recueillies par Iriki *et al.* (1996). Comme pour le singe, l'utilisation de l'outil a étendu le schéma corporel, d'où un élargissement de l'espace péripersonnel qui va inclure tout l'espace compris entre le corps de la patiente et le stimulus. L'espace lointain est, par conséquent, reconfiguré en espace proche, tel que le codage de la représentation de l'espace proximal soit activé. Ainsi, puisque la représentation de l'espace proche est affectée par la négligence, cette dernière se manifeste aussi dans le secteur distal.

Une restructuration identique du lointain en proche a, également, été observée dans un groupe de patients lésés de l'hémisphère droit et présentant une extinction tactile transmodalitaire (Farnè & Làdavas, 2000). Cette expression fait référence à un signe clinique, pour lequel des patients ayant une altération de l'hémisphère droit expriment des difficultés à ressentir des stimulations tactiles délivrées sur leur main gauche controlatérale à la lésion, lorsqu'un stimulus visuel est présenté au même moment au niveau de leur main droite ipsilatérale à la lésion (Di Pellegrino *et al.*, 1997 ; Mattingley *et al.*, 1997). Ce phénomène peut être expliqué grâce aux enregistrements neurophysiologiques effectués sur le singe, révélant le caractère bimodal des neurones codant pour l'espace péripersonnel entourant chaque partie du corps et notamment la main (Fogassi *et al.*, 1996 ; Grazziano & Gross, 1995). En effet, si une telle population cellulaire existe chez l'homme, le stimulus visuel appliqué à proximité d'une main risque de suractiver la représentation de cette main (Driver & Spence, 1998), ce qui va concurrencer (Driver *et al.*, 1997) l'activation produite par la stimulation tactile de l'autre main, et ainsi entraîner une extinction transmodalitaire quand cette dernière main a le désavantage d'être représentée par une aire lésée (Làdavas *et al.*, 1998).

Dans l'expérience de Farnè et Làdavas (2000), l'extinction transmodalitaire visuo-tactile a été évaluée en présentant un stimulus visuel éloigné de la main ipsilatérale à la lésion

du patient, à une distance correspondant à l'extrémité distale du râteau qu'il tient statiquement en main. Les résultats montrent que l'extinction transmodale est plus sévère après que le sujet ait utilisé le râteau pour récupérer des objets distants que dans une condition pour laquelle le râteau n'est pas utilisé. Là encore, cette expansion évidente de l'espace périmanuel ne persiste que quelque temps après l'utilisation de l'outil. Après une période de repos d'environ cinq minutes, le niveau d'extinction transmodale redevient comparable à celui obtenu avant l'utilisation du râteau, suggérant que l'extension spatiale de l'espace péripersonnel de la main s'est contracté autour de la main du patient. Enfin, un mouvement de pointage en direction des objets produit également une extinction transmodale identique à celle constatée avant l'utilisation de l'outil. Cela montre que l'expansion de l'espace périmanuel est strictement dépendante de la manipulation de l'outil, ajustée aux objets physiquement atteignables situés hors d'atteinte de la main, et ne résulte pas simplement d'une activité motrice directionnelle.

En conclusion, ces récentes découvertes en neurophysiologie et neuropsychologie prouvent à l'évidence que la représentation de l'espace périmanuel peut s'étendre le long de l'axe d'un outil afin d'inclure toute sa surface. De plus, de telles observations montrent que le remodelage de l'espace distal en espace proximal s'opère à travers un redimensionnement de l'aire périmanuelle, au niveau de laquelle s'effectue une intégration visuo-tactile. Par définition, dans une situation de téléopération, l'individu voit augmenter son champ d'intervention sur le monde grâce à un outil mécanique, comme ce fut le cas pour les expériences précédentes qui employaient un simple bâton ou râteau. Aussi, on pourrait faire l'hypothèse qu'un même type d'extension de l'espace péricorporel de l'opérateur puisse s'engendrer afin d'englober le télérobot. Cependant, une autre caractéristique même de la téléopération est qu'elle soustrait à l'opérateur tout contact physique direct avec l'engin contrôlé. Ainsi, ce manque de sensation tactile directe pourrait fort bien perturber le phénomène d'intégration visuo-tactile, pierre angulaire des propriétés dynamiques du schéma corporel. En effet, des travaux ont déjà souligné une absence d'extension de l'espace périmanuel lors de la présence d'une discontinuité physique entre un individu et un bâton dans une situation de relation passive avec l'outil (Maravita *et al.*, 2001). Dans le cas que nous explorons, le téléopérateur est un sujet actif, mais il est soumis à cette déficience tactile, en plus de laquelle se rajoutent les discordances visuo-kinesthésiques mentionnées en introduction (Orliaguet & Coello, 1998). C'est donc dans ce contexte tout particulier que s'inscrit l'originalité de la situation de téléopération pour l'étude de la modulation de la représentation spatiale et motrice de l'homme. Pour notre application dans l'optique d'une CHM efficace, cette restructuration spatiale est utilisée comme un indice servant à évaluer le

niveau d'appropriation de l'espace de travail du robot en tant qu'extension de l'espace péricorporel de l'opérateur.

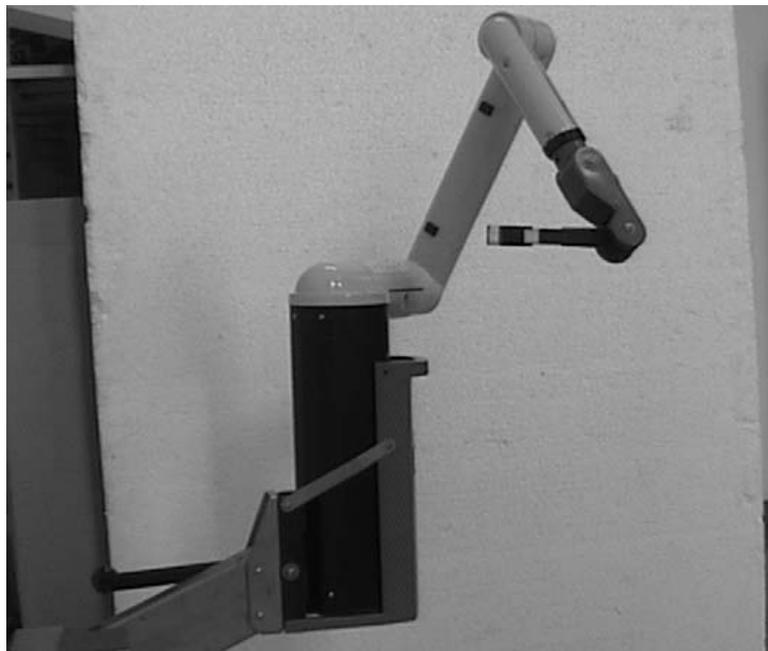
## **II. Objectifs expérimentaux**

Il y a deux objectifs fondamentaux auxquels va s'atteler cette première partie d'étude. Premièrement, il s'agit de découvrir des indices neuroscientifiquement fiables permettant de mettre en évidence que l'opérateur humain est capable de s'approprier un système de téléopération, et plus précisément dans le cas présent de télémanipulation. Nous avons déjà précisé que ce que l'on entend par appropriation d'une machine consiste en une adaptation des schèmes préexistants de l'utilisateur pour les faire coïncider avec les nécessités de la situation nouvellement rencontrée. Cependant, si cette définition a le mérite d'être relativement précise d'un point de vue théorique, elle apparaît beaucoup plus floue sur le plan pratique. Néanmoins, on sait que cette adaptation des schèmes à l'outil doit s'accompagner d'un remodelage de la représentation mentale de l'opérateur, et en particulier de ses référentiels spatiaux d'intervention sur l'environnement (Rabardel, 1993b). Aussi, nous émettons l'hypothèse qu'un critère de bonne adaptation homme-machine, passe par un élargissement de la représentation du champ d'action de l'opérateur de son espace proche à l'espace de travail de l'instrument. Cette conception se rapproche des critères d'évaluation de la sensation de présence, pour laquelle certains auteurs vont jusqu'à postuler l'existence d'un processus mental d'incorporation de l'individu dans le monde virtuel (Biocca, 1997). Ainsi, ces considérations nous permettent d'aborder d'une manière beaucoup plus concrète la notion d'appropriation. Celle-ci impliquant une déformation du schéma corporel de l'opérateur, un moyen relativement aisé de la mettre éventuellement en évidence sera donc de relever des preuves expérimentales suggérant un allongement de l'espace péripersonnel de l'opérateur englobant le bras télérobotique.

Comme nous l'avons vu, l'adaptation des schèmes implique un double processus d'assimilation et d'accommodation. Aussi, suivant la situation, l'un des processus peut prendre le pas sur l'autre. Lorsque le dispositif le permet, il est généralement préférable de placer l'opérateur dans une condition favorisant une adaptation par processus à dominante d'assimilation (Rabardel, 1995 ; Gaillard, 1993). C'est pourquoi, l'évaluation de l'appropriation sera effectuée dans un premier temps suivant une approche anthropomorphique, partant du principe qu'une configuration de type humain facilitera l'utilisation des schèmes naturels de l'opérateur, lui limitant ainsi la lourde contrainte

d'élaborer de nouveaux schèmes, dont la réussite n'est jamais certaine (Rabardel, 1995). D'où, le second objectif expérimental visera à savoir si la reproduction sur le robot d'une relation œil-bras anthropomorphique est une situation facilitatrice pour que l'opérateur parvienne à l'appropriation. Dans ce type d'interrogation il serait étonnant d'obtenir un résultat de type « tout ou rien », ne serait-ce qu'à cause des importantes différences interindividuelles sur le plan morpho-fonctionnel. C'est pour cela nous avons décidé de traiter le problème à partir d'une échelle graduelle dans le respect de l'anthropomorphie de la relation caméra-bras robotique. Cette stratégie expérimentale va ainsi nous permettre d'évaluer le degré de fidélité qu'il serait éventuellement nécessaire de conserver par rapport au modèle humain, pour aboutir à cette facilitation du phénomène d'appropriation. Enfin, pour clore cette première partie d'étude, nous terminerons par une expérience servant à montrer si les différences obtenues selon les conditions sur le plan perceptif se retrouvent corroborées au niveau de la dimension motrice de la télémanipulation.

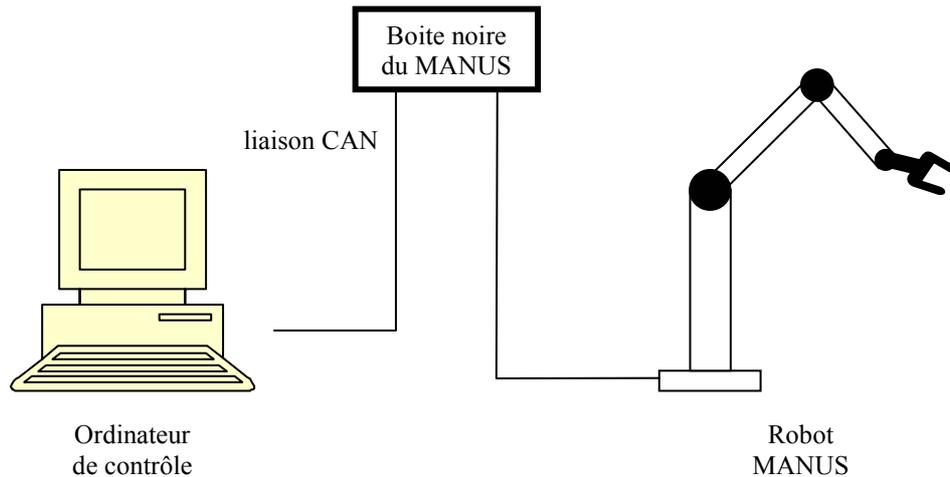
### **III. Matériel expérimental : le robot manipulateur MANUS**



**Figure 15 :** Photo du télémanipulateur MANUS en position dépliée.

Le MANUS (figure 15) est un robot manipulateur initialement conçu pour être monté sur un fauteuil roulant. Son objectif est de favoriser l'indépendance des personnes lourdement handicapées, comme celles atteintes par la perte de l'usage de leurs quatre membres, grâce à une augmentation de leur potentiel d'activité et par compensation de leur incapacité motrice

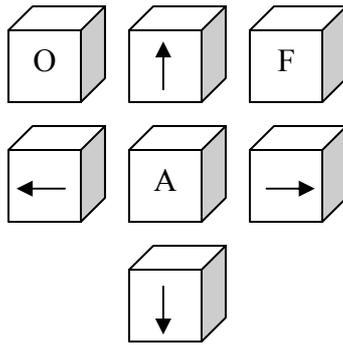
de préhension. Le robot MANUS dispose de six degrés de liberté et son extrémité distale est équipée d'une pince motorisée permettant la capture d'objets (d'une masse inférieure à 1,5 kg) dans toutes les directions de l'espace. Tout en sachant que cet appareil peut se mouvoir suivant un système de coordonnées articulaires ou cartésiennes. De plus, il est muni d'un indicateur digital qui renseigne l'utilisateur sur l'état de fonctionnement du robot. Enfin, le contrôle du MANUS s'effectue soit à partir d'une boîte à touches, soit par joystick, ou soit à travers un ordinateur.



**Figure 16 :** Architecture du système de gestion des commandes du bras MANUS.

C'est cette dernière option qui a été choisie dans les expériences à suivre car, elle permet à la fois une mémorisation des patterns d'exécution du mouvement et le développement ultérieur de certaines automatisations de séquences de geste. Pour assurer cet échange d'information, l'ordinateur est relié au robot par le bus CAN<sup>10</sup> (figure 16). Ainsi, dès qu'une commande est envoyée depuis le clavier informatique, celle-ci est transmise à la boîte de contrôle du bras robotique, pour être exécutée via la carte interface CAN. Ce bus véhicule différents types de message tels que la position angulaire du bras permettant de définir la configuration de celui-ci, les messages d'états en provenance du MANUS (warnings, erreurs...) et le code de l'action effectuée (i.e., le mode de contrôle articulaire ou cartésien). Enfin, c'est également à travers ce bus de connexion que seront enregistrés les transferts d'informations entre opérateur et machine. Pour effectuer ces opérations le sujet dispose d'une interface de commande de type boîte à boutons dont les fonctions sont détaillées sur la figure 17.

<sup>10</sup> Le CAN (Control Area Network) est un protocole ou bus de communication série industriel qui permet de façon efficace la distribution de commande en temps réel et avec un haut niveau de sécurité.



**Figure 17 :** Interface de contrôle du bras manipulateur. Les flèches dirigées vers le haut et vers le bas (axe antéropostérieur) sont respectivement dédiées au déplacement vers l'avant et vers l'arrière. Les flèches orientées à gauche et à droite (axe latéral) sont destinées respectivement aux mouvements latéraux gauches et droits. Le déplacement à l'oblique est rendu possible par un enclenchement simultané des touches de l'axe antéropostérieur et de l'axe latéral. Enfin, les touches A, O et F sont respectivement dévolues à l'arrêt du mouvement, l'ouverture et la fermeture de la pince. A noter que la vitesse et la direction du geste est modulable en fonction du nombre de pressions appliqué au niveau de chaque touche.

#### **IV. Evaluation de l'appropriation par rapport à la référence humaine**

Expérimentalement parlant, le meilleur moyen pour évaluer si l'opérateur est capable de s'approprier un télémanipulateur robotique, est de comparer la performance humaine en condition de téléopération à celle réalisée en condition naturelle. Dans cette première expérience, l'appropriation est appréciée en mesurant la modification de la représentation du schéma corporel de l'opérateur suite à l'utilisation du télérobot. Précisément, nous allons chercher à voir si la manipulation à distance d'un robot entraîne un élargissement de l'espace péricorporel de l'utilisateur englobant l'espace de travail du bras robotique, comme cela a été montré lorsqu'un sujet manipule un outil de type bâton ou râteau (Berti & Frassinetti, 2000 ; Iriki *et al.*, 1996). L'originalité de ce questionnement est que, contrairement à ces études, le sujet se trouve ici face à un instrument présentant une interface de contrôle beaucoup plus complexe et, surtout, il ne dispose pas d'un contact physique direct avec le bras manipulateur.

Dans les conditions expérimentales qui furent les nôtres, et pour lesquelles ni intervention neurochirurgicale ni patient cérébrolésé n'ont pu être utilisés, cette extension a

été évaluée à partir d'un indice d'estimation du pouvoir d'*affordance*<sup>11</sup> d'un effecteur sur son environnement. L'*affordance* d'un objet ou d'une situation sont les activités qui s'offrent ou *affordent*<sup>11</sup> à un organisme suivant certaines possibilités d'action (Gibson, 1979 ; Turvey & Shaw ; 1979). Ces potentialités d'action sont déterminées par l'adéquation entre les propriétés de l'environnement et les propriétés du système d'action de l'organisme. Par exemple, un objet invite à la préhension si sa taille, sa forme et la composition de sa surface sont compatibles avec la morphologie fonctionnelle des membres manipulateurs de l'organisme (Newell & Scully, 1987). De même, une distance invitera à un simple mouvement d'extension si sa longueur est inférieure à la dimension du bras de l'individu.

Warren et Whang (1987) ont proposé une méthode de mesure pour évaluer l'impact des variables environnementales sur les variables de l'organisme. Ils ont défini un nombre Pi pour caractériser le rapport entre une dimension de l'organisme et une variable environnementale qui lui est associée. Grâce à cet indice il est possible d'identifier les contextes optimaux pour lesquels les actions sont plus aisées ou efficaces et, à l'inverse, des contextes critiques où une phase de transition vers une action qualitativement différente est nécessaire. Ainsi, dans les situations expérimentales qui vont suivre, l'objet à saisir est à une distance (D) variable relativement à la longueur du bras robotique (R). Aussi, lorsqu'on augmente l'écart entre l'objet et le bras, il apparaît une distance critique pour laquelle la saisie par simple extension n'est plus possible mais nécessite, maintenant, le passage à une action où le mouvement du bras est couplé au déplacement de la plate-forme porteuse. La valeur de ce rapport critique nous est fourni par l'indice Pi tel que :  $\Pi = D/R$ .

La grande valeur de cet indice est qu'il ne révèle pas seulement une simple dimension géométrique de l'appréciation de l'espace, mais bien aussi les capacités représentationnelles de l'opérateur. En effet, pour que l'individu puisse estimer la distance pour laquelle la simple extension du bras n'est plus suffisante pour atteindre l'objet, il y a nécessité d'opérer une transformation à partir des coordonnées absolues de l'environnement en coordonnées référencées au système robotique (Fitch & Turvey, 1978). Cela signifie que cet indice d'*affordance* peut être perçu comme une information intrinsèque qui spécifie les dimensions de l'espace à partir de l'échelle du système homme-machine et, plus généralement, de son échelle métrique d'action (Warren, 1984). De telles propriétés justifient donc pleinement son

---

<sup>11</sup> Le terme anglais *affordance*, que nous n'avons pas traduit faute d'un équivalent français qui en rende toutes les nuances, est un néologisme désignant à la fois le fait d'offrir (*to offer*) et celui de fournir (*to afford*) quelque chose.

emploi, puisqu'au final il renvoie une valeur numérique permettant d'inférer une évaluation relativement précise de l'étendue de la déformation du schéma corporel de l'opérateur.

Ici,  $P_i$  est égal à l'estimation que le sujet a de la distance maximale de saisie du bras rapporté à la longueur effective de ce bras. Ainsi, plus ce rapport tend vers 1, plus l'individu possède une bonne représentation de son champ d'intervention sur le monde et donc de son schéma corporel. Par la suite, le chiffre  $P_i$  obtenu en condition robotique (avec le bras MANUS) est comparé à celui obtenu en condition naturelle (avec le propre bras du sujet). Si les divers  $P_i$  calculés sur un espace péribrachial ne diffèrent pas significativement entre les deux conditions, on pourra alors conclure que ce résultat constituera un argument expérimental en faveur d'une expansion possible de l'espace pericorporel de l'opérateur assimilant l'espace compris jusqu'à l'extrémité distale du bras manipulateur. Notre hypothèse est que malgré l'absence de contact physique direct entre l'outil et l'opérateur, ce dernier devrait parvenir à assimiler le champ d'activité du robot dans son propre schéma corporel, preuve ainsi d'une appropriation.

## **IV.1. Protocole expérimental**

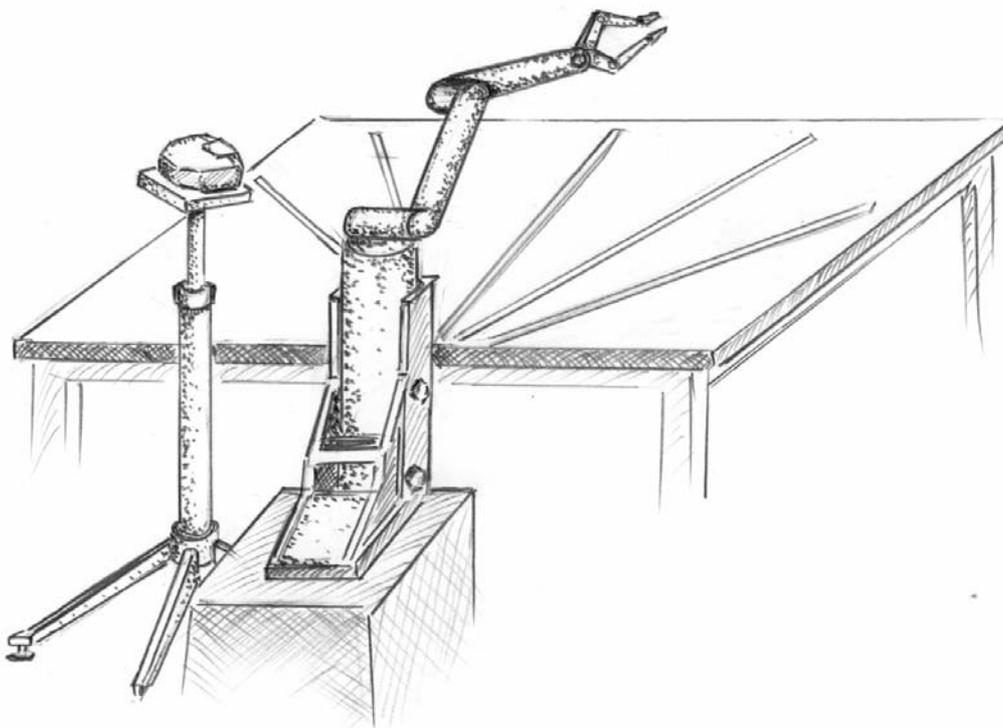
### IV.1.1. Sujets

Une population de quatorze étudiants ou membres du laboratoire âgés entre 25 et 30 ans a participé à l'ensemble des quatre sessions expérimentales. Ces quatorze individus se répartissaient sur deux groupes indépendants fournissant ainsi un effectif de sept sujets par condition expérimentale (téléopération vs naturelle). Ils possédaient tous une vue normale ou utilisaient des verres correcteurs leur conférant une bonne vision. Un soin particulier a été observé quant à la latéralité des sujets, de manière à ce que chacun d'entre eux soient droitier. Enfin, tous ces participants étaient totalement naïfs sur les objectifs de l'expérimentation. Cette dernière les aura occupé environ une heure par jour sur quatre jours, ce qui a constitué une quotité horaire totale de quatre heures par sujet.

### IV.1.2. Conditions

Il y avait deux conditions expérimentales différentes : une situation de « téléopération » et une situation dite « naturelle ». La condition de téléopération est une situation pour laquelle le sujet n'a aucune relation directe avec l'environnement où

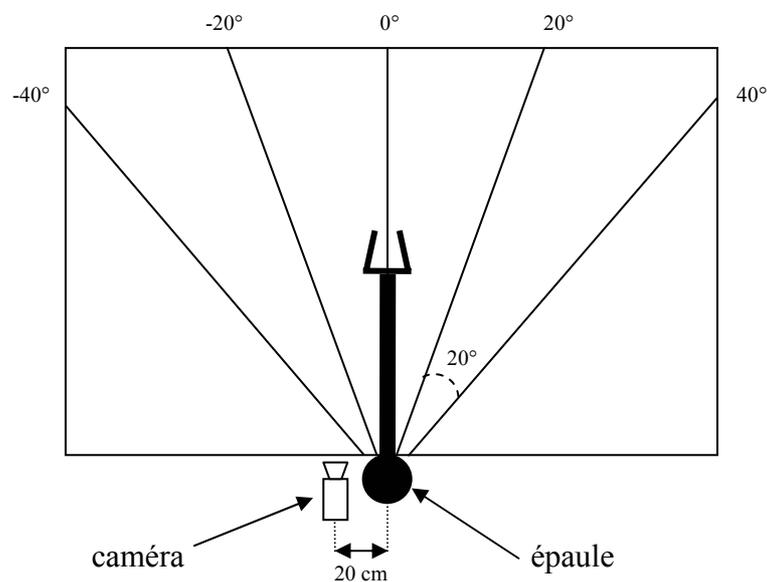
s'accomplit la tâche. En effet, cette dernière s'effectue par l'intermédiaire du bras robotique, annulant ainsi les contacts tactiles, et est supervisée, via une caméra vidéo, sur un terminal de visualisation. L'écran du terminal présente une dimension de 31 cm de long sur 23 cm de large. La caméra a, quant à elle, la particularité d'être orientable en site et en azimut, et de disposer d'un champ optique de 50° à l'horizontal et 38° à la verticale. Elle est située au-dessus, à gauche et légèrement en retrait (pour pallier à la limitation du champ optique) par rapport à l'axe de rotation (ou épaule) du robot (figure 18). Une telle configuration est dite *anthropomorphique*, car elle s'apparente à la relation géométrique qui unit l'organe céphalique au membre supérieur droit chez l'homme. Cette disposition peut donc être qualifiée plus précisément d'*anthropomorphique droite*, raison pour laquelle a été choisie une population de droitiers. Dans la condition naturelle, les individus sont placés exactement dans la même disposition, relativement à l'environnement expérimental, que l'était le robot. Concrètement, cela signifie que l'axe de leur épaule droite est centré sur une position entièrement identique à celle précédemment occupée par le bras robotique. Bien évidemment, les différences essentielles vis-à-vis de la condition téléopérée sont que les sujets peuvent ici agir et percevoir directement à travers leurs propres organes moteurs et perceptifs.



**Figure 18 :** Représentation schématique en vue de  $\frac{3}{4}$  arrière droit du dispositif.

### IV.1.3. Procédure

Tout au long de l'expérience, le robot ou l'humain (suivant la condition considérée) sont placés face à une table (figure 19). L'axe de rotation de leur épaule respective est aligné sur la médiane de la longueur de la table. Depuis le centre de cet axe irradient cinq rayons seulement visibles par l'expérimentateur. Ces droites sont espacées entre-elles par des angles de  $20^\circ$ , en partant de  $-40^\circ$  jusqu'à  $40^\circ$ , le rayon  $0^\circ$  correspondant à la médiane. A partir de ce dispositif, la procédure expérimentale s'achemine en trois phases successives.



**Figure 19 :** Détails des caractéristiques du dispositif expérimental en vue de dessus.

Dans un premier temps, chaque groupe de sujets s'entraîne à saisir un objet cylindrique, de 2,5 cm de diamètre pour 8 cm de haut, avec leur bras droit versus avec le bras robotique. Cette saisie a cours sur quatre positions aléatoires par rayon, s'étalant sur des distances plus ou moins voisines de la longueur d'extension maximale du bras. Ainsi, les sujets peuvent aussi bien rencontrer des objets atteignables que non atteignables. Quoiqu'il en soit, dans tous les cas, ils ont la consigne de tenter de saisir le cylindre le plus rapidement et précisément possible par simple extension du bras, sans avoir à l'accompagner d'un déplacement du buste. En effet, pendant tout le cheminement de l'expérience, le dos du sujet doit rester plaqué contre le dossier de la chaise. De plus, il faut préciser que le contrôle du

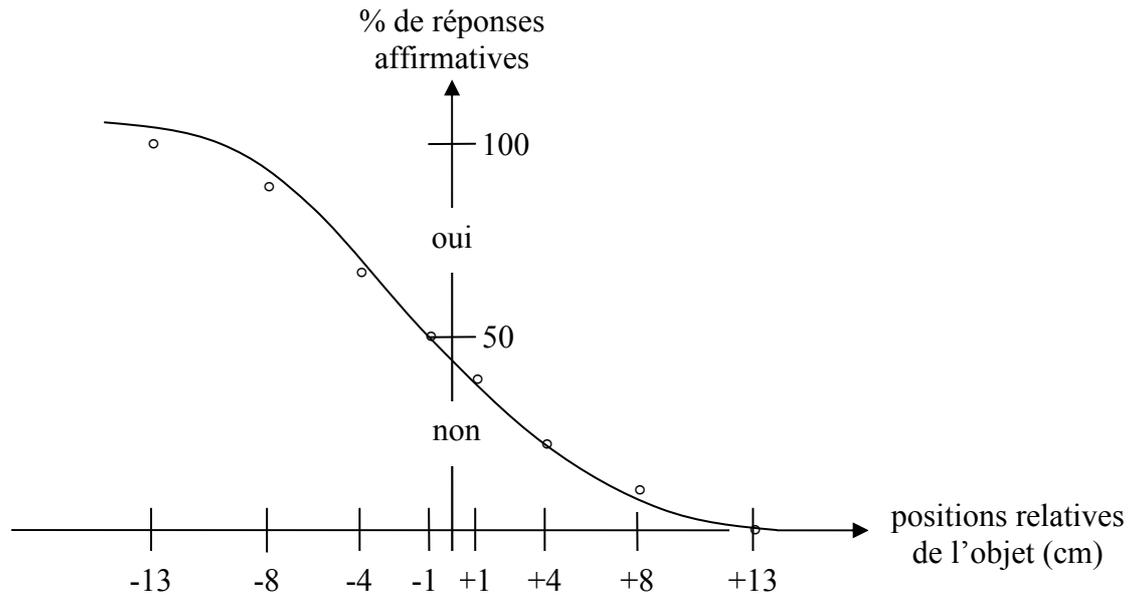
mouvement du robot s'effectue uniquement en mode cartésien<sup>12</sup> car, c'est celui qui se rapproche le plus de la commande motrice humaine. Enfin, le départ du mouvement est toujours initié à la même position, l'axe de la pince ou de la main aligné sur le rayon où a lieu la saisie.

Après l'entraînement vient une phase de calibration. Celle-ci consiste à ce que le sujet, tenant l'objet entre le pouce et l'index ou en bout de pince, dépose ce dernier le plus loin possible pour chaque rayon, toujours en veillant à réaliser cette action par simple extension du bras. Alors, la distance ainsi obtenue sur chacun des rayons va nous indiquer la valeur référence (R) du champ d'intervention ou espace peripersonnel du bras humain et du bras robotique, laquelle est nécessaire au calcul de l'indice Pi. Une fois ces étapes préalables accomplies, le test expérimental proprement dit peut enfin commencer.

La dernière phase va correspondre à la recherche de la distance seuil pour laquelle le sujet estime qu'il y a transition entre son espace de saisie et son espace locomoteur. Pour cela huit positions d'objet ont été choisies en fonction de la valeur de la longueur référence (R) obtenue en calibration. Ainsi, la répartition de ces huit positions est de telle sorte qu'elle soit centrée autour de cette valeur référence, afin qu'il y ait autant de positions supraliminales que d'infra-liminales, soit quatre et quatre. Concrètement, les positions ont une valeur de  $\pm 1$  cm,  $\pm 4$  cm,  $\pm 8$  cm et  $\pm 13$  cm par rapport à la référence, de manière à ce qu'il y ait une augmentation d'1 cm entre chaque écart successif. La tâche conférée au sujet est alors de répondre par « oui » ou « non » à la question : « Pouvez-vous saisir l'objet présenté par simple extension du bras ? ». Pour obtenir une valeur seuil précise, chacune des huit positions est présentée dix fois pour chacun des cinq rayons. Une fois les 80 réponses par rayon enregistrées celles-ci sont comptabilisées, la distance seuil (S) étant la valeur correspondant au pourcentage de réponse oui et non identique, égale à 50% (Bonnet, 1986). Afin de retrouver la distance des 50%, une courbe passant par les points testés est dressée telle que l'illustre la figure 20. Par la suite, cette valeur (S) est divisée par la valeur (R) pour calculer le ratio Pi, lequel sera comparé entre les deux conditions expérimentales. Enfin, avant de terminer il faut souligner que la procédure expérimentale est appliquée successivement rayon par rayon selon un ordre randomisé d'une session à l'autre.

---

<sup>12</sup> Dans ce mode de contrôle l'opérateur commande directement le déplacement de l'extrémité distale du bras sans se soucier des rotations angulaires à effectuer au niveau de chaque articulation pour conserver une direction constante. En effet, contrairement au mode articulaire, les rotations sont calculées ici de manière automatique, via la résolution d'un problème inverse, rendant ainsi la commande naturellement plus proche de celle du bras humain.



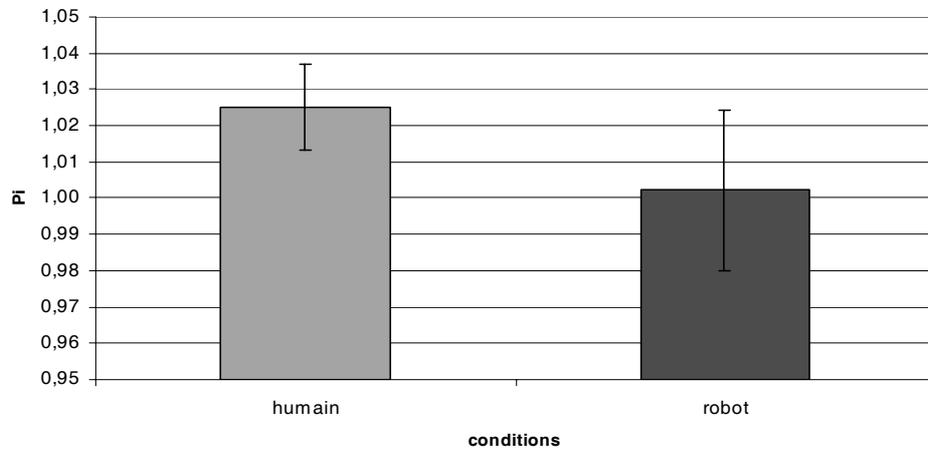
**Figure 20 :** Principe de la méthode de recherche de la distance de saisie seuil. La valeur de celle-ci est obtenue pour la position correspondant au pourcentage de réponses « oui » et « non » identique = 50%. Dans l'exemple représenté, la courbe de régression indique une valeur seuil d'environ -1 cm.

## IV.2. Résultats

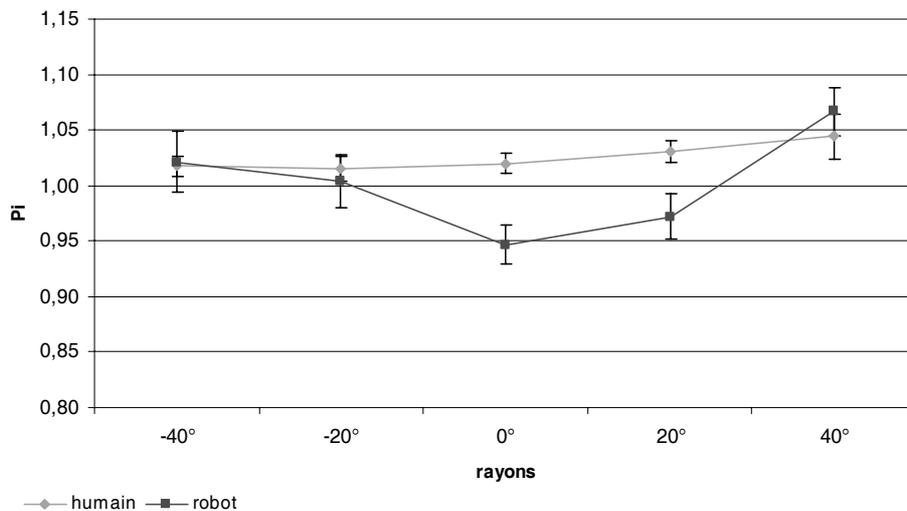
Le premier résultat majeur de cette expérience est de révéler l'absence de différence statistiquement significative entre la valeur  $P_i$  de la condition de téléopération et celle de la condition de référence humaine ( $F [1, 12] = 3,11$  ; N.S). Cette observation met donc en évidence que la précision de délimitation de l'espace de saisie de l'opérateur avec le bras robotique est comparable à la performance effectuée par l'homme avec son propre bras (figure 21). Le plus remarquable est de constater que cette égalité s'installe relativement rapidement dans le temps, puisqu'on n'observe pas d'effet d'interaction entre les conditions et les sessions expérimentales ( $F [3, 36] = 0,48$  ; N.S).

Cependant, un effet d'interaction statistiquement significatif existe entre les deux conditions et les rayons testés ( $F [4, 48] = 6,48$  ;  $p < 0,003$ ). Effectivement, la condition de téléopération enregistre un effet de rayon ( $F [4, 24] = 10,37$  ;  $p < 0,001$ ) alors que la condition naturelle n'y est pas significativement sensible ( $F [4, 24] = 2,4$  ; NS). Aussi, sur un plan qualitatif, le décours de l'indice  $P_i$  suivant les rayons pour le bras humain tend vers une représentation relativement linéaire (dénotant une estimation circulaire de l'espace), au

contraire du Pi calculé en robotique qui s'apparente davantage à une courbe en « V » plus ou moins symétrique par rapport à 0° (figure 22).



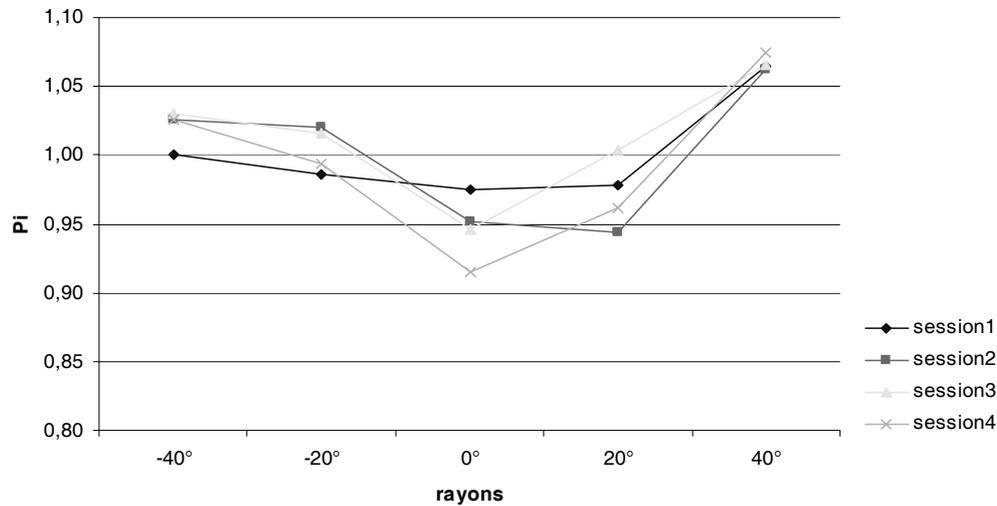
**Figure 21 :** Valeur de l'indice Pi d'évaluation de la distance de saisie en condition humaine et robotique.



**Figure 22 :** Valeur de l'indice Pi en fonction des rayons testés, pour chacune des conditions expérimentales.

De plus, si l'on effectue une analyse plus détaillée du Pi robot suivant les rayons au fur et à mesure de l'évolution de l'expérience, on constate que cette courbe en « V » s'installe progressivement au cours des sessions (figure 23). En effet, on ne note pas encore d'effet de rayon à la première session expérimentale ( $F [4, 24] = 0,8$  ; NS), à la différence de la session 4 où la courbe est la plus creusée et donc, au niveau de laquelle l'effet est le plus

symétriquement marqué ( $F [4, 24] = 15,71 ; p < 0,001$ ). Ainsi,  $P_i$  est inférieur à 1 pour les rayons centraux ( $0^\circ$  et  $20^\circ$ ) et supérieur à 1 pour les latéraux ( $-40^\circ$  et  $40^\circ$ ).



**Figure 23 :** Valeur de l'indice  $P_i$  de la condition robotique, au cours des quatre sessions expérimentales.

En revanche, il est intéressant de remarquer que cet effet de rayon disparaît de la 4<sup>ème</sup> session, lorsque l'on ne rapporte plus la distance seuil (S) estimée par le sujet sur la longueur référence (R) du bras, mais qu'on traite cette donnée de manière indépendante ( $F [4, 24] = 1,8 ; NS$ ). Ce résultat montre que l'irrégularité dans la délimitation de l'espace de saisie du robot semble provenir d'un biais rencontré au niveau de l'allonge du bras.

### IV.3. Discussion

Les résultats de cette expérience ont montré dans un premier temps, qu'il n'y avait pas de différence significative entre la valeur du  $P_i$  de la condition naturelle et celle du  $P_i$  de la condition de téléopération. Cela signifie qu'un individu agissant directement sur l'environnement ou à travers un outil de type télémanipulateur robotique, présente dans les deux situations une capacité aussi précise pour circonscrire la distance limite d'intervention de son organe préhenseur. De plus, il apparaît que cette identité dans la précision représentationnelle s'acquiert de manière relativement rapide, suggérant ainsi que la réorganisation de la représentation de l'espace peut s'initier sans une utilisation extensive de l'outil (Berti & Frassinetti, 2000 ; Maravita *et al.*, 2001). De telles observations confirment

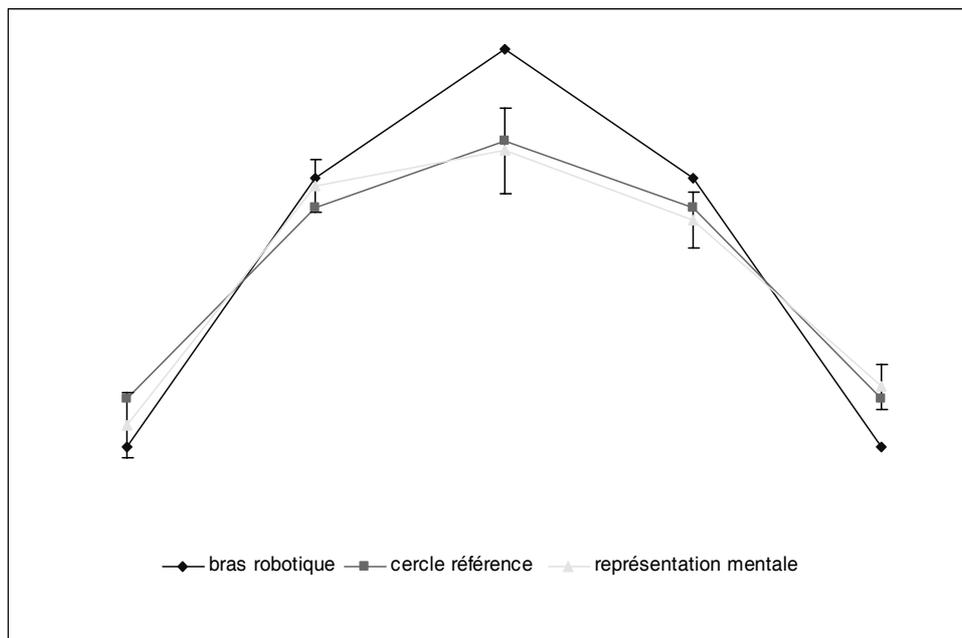
donc bien notre hypothèse de départ, à savoir que cette proximité de performance témoigne d'un phénomène d'appropriation de l'engin téléopéré par l'opérateur humain.

Cependant, il a été également constaté une certaine différence de valeur de Pi en fonction des rayons entre les deux conditions expérimentales. Contrairement à la situation naturelle, la condition robotique expose un Pi largement inférieur à 1 au niveau des rayons centraux (0° et 20°), les rayons latéraux (-40°, -20° et 40°) étant quant à eux comparable d'une condition à l'autre. Du fait de l'essence même de l'indice Pi qui est, rappelons-le, le rapport entre une caractéristique de l'environnement (ici, la distance de saisie) et une caractéristique de l'organisme (ici, la longueur du bras), deux interprétations sont possibles. Soit le Pi inférieur à 1 provient d'une surestimation des distances par le sujet soit, au contraire, ce résultat est dû à une sous-estimation de la longueur du bras robotique.

D'emblée, il semble que nous pouvons rejeter la première explication. En effet, si l'on se réfère aux nombreux travaux scientifiques réalisés dans le domaine de l'estimation des distances, nos conditions expérimentales sont incompatibles avec une interprétation en terme de surestimation. Deux paramètres essentiels vont à l'encontre d'une telle explication. Le premier concerne la disparité visuelle. Dans la situation de téléopération, l'opérateur visionnait la scène via une seule caméra vidéo. Ainsi, il ne bénéficiait que d'une perception monoculaire de l'espace. Or, les études neuroscientifiques montrent qu'une vision monoculaire a plutôt tendance à entraîner une sous-estimation des distances que l'inverse (Crannell & Peters, 1970 ; Morrison & Whiteside, 1984 ; Servos *et al.*, 1992). De plus, une seconde caractéristique de la supervision par caméra est que celle-ci n'offre qu'une perception relativement limitée de l'environnement (ici, 50° horizontal), en tout cas bien plus comprimé que le champ optique naturel (environ 160° horizontal). Et, là encore, cette réduction du champ visuel efficace est connue pour provoquer une appréciation sous-estimée des distances (Bingham & Pagano, 1998 ; Coello & Greal, 1997).

Si la première interprétation paraît donc peu satisfaisante au regard de la littérature des neurosciences, l'explication en terme de sous-estimation de la longueur du bras l'est davantage. En effet, nous avons déjà décrit que l'environnement est organisé en couches circulaires concentriques à l'observateur (Cutting, 1997). Plus exactement, il a été découvert que l'espace péripersonnel d'un individu est assimilable à des secteurs arrondis (sphériques ou cylindriques) centrés sur chaque partie singulière du corps (Fogassi *et al.*, 1996). Ainsi, au vu de son anatomie, l'épaule humaine est entourée d'un secteur cylindre virtuel qui circonscrit le champ d'atteinte du bras. Cette propriété confère ainsi à l'individu une représentation relativement circulaire de son espace de saisie.

Or, contrairement au bras humain, nous avons remarqué que le bras MANUS présentait un biais d'allonge, tel que mentionné à la fin de la section résultat. En réalité, après une analyse plus approfondie, il se révéla que ce biais était dû à une anisotropie de la capacité d'extension du MANUS suivant son angle horizontal de déploiement. Précisément, ce bras a un rayon d'extension plus important suivant son axe antéro-postérieur (le rayon 0° de notre dispositif) et diminue progressivement avec l'éloignement par rapport à cet axe médian. D'où, l'espace de saisie du bras robotique s'apparente davantage à une ellipse centrée sur l'axe de rotation de l'épaule du robot qu'au un cercle comme c'est le cas pour l'homme.



**Figure 24 :** Délimitation de l'espace d'atteinte du bras robotique et représentation mentale de celui-ci par l'opérateur.

En revanche, les derniers résultats ont montré qu'il n'y avait pas d'effet de rayon et donc pas d'anisotropie au niveau de la distance seuil (S) estimée à la 4<sup>ème</sup> session. Cette observation révèle ainsi que la représentation mentale de l'espace de saisie du robot par l'opérateur est, elle, assez régulièrement circulaire. Il est alors possible de dresser à partir des données expérimentales un graphique sur lequel apparaît distinctement la délimitation de l'espace réel d'atteinte du robot et la représentation mentale qu'en a l'opérateur (figure 24). A noter que le cercle référence tracé sur la figure, et pratiquement confondu avec la courbe représentationnelle, présente un diamètre d'une valeur moyenne entre le grand axe et le petit axe de l'ellipse robotique. Cette illustration, obtenue à partir d'une interprétation par rapport à

l'estimation de la longueur du bras, explique de manière cohérente les différentes tendances du pattern Pi en fonction des rayons observés lors de l'analyse des résultats. En effet, étant donné que la longueur du bras est supérieure à sa représentation vers l'avant, il est normal que Pi soit inférieur à 1 pour les rayons centraux, à l'inverse le diamètre robotique latéral étant plus petit que le représentationnel, Pi est supérieur à 1 sur des rayons latéraux.

Le fait que la représentation de l'espace d'extension du bras robotique se rapproche d'un cercle, comme la représentation du bras humain lui-même, constitue un fondement majeur. Il nous permet de déduire que l'opérateur doit transposer la représentation de son propre bras au bras robotique. Cela démontre bien que le sujet placé dans cette condition anthropomorphique de télémanipulation semble davantage situé dans une logique assimilatrice qu'accommodatrice. En effet, alors qu'une accommodation eut été nécessaire pour acquérir une représentation correcte des capacités d'extension du robot, l'opérateur continue à assimiler au bras robotique les propriétés de son propre bras. Une telle observation nous apporte deux enseignements principaux. Tout d'abord, elle constitue donc un argument supplémentaire en faveur de la mise en place d'un réel processus d'appropriation qui, même s'il n'est pas adapté à la situation (une assimilation au lieu d'une accommodation), est néanmoins bel et bien présent. D'où, deuxièmement, ce résultat va avoir un impact important sur la conception technique du système. Il pose la question de la réelle pertinence de configurer le robot selon une architecture anthropomorphe, sachant que celle-ci peut induire chez l'opérateur une propension excessive à générer des processus d'appropriation à dominante assimilatrice, lesquels ne sont pas toujours adaptés. Du reste, ce type de problème a déjà été noté chez d'autres auteurs (Rabardel, 1993b ; Poyet, 1993), qui ont souligné l'effet parfois pervers d'une configuration robotique anthropomorphe sur les représentations fonctionnelles que l'individu s'en crée à priori. C'est pourquoi l'expérience suivante va s'attacher à tester la qualité de l'appropriation en fonction du caractère plus ou moins anthropomorphe de la configuration du dispositif de télémanipulation.

Avant de passer directement à cette seconde expérience, il est nécessaire d'émettre une remarque importante. Le traitement statistique a montré qu'il n'y avait pas d'effet d'interaction entre les Pi totaux des deux conditions et les sessions, alors qu'un effet de sessions a bien été enregistré pour le caractère en « V » de la représentation du Pi en fonction des rayons testés. Aussi, l'absence de différence entre le Pi robot total et le Pi humain total ayant été interprétée au même titre que l'anisotropie spatiale du Pi robot, comme des révélateurs de l'instauration d'un phénomène d'appropriation, on peut s'interroger sur le fait que ces deux indices ne soient pas identiquement sensibles au facteur temporel. Une

explication semble venir de la nature de l'interface de contrôle utilisée. En effet, celle-ci est du type boîte à boutons. Ce qui signifie qu'il est beaucoup plus complexe pour l'opérateur de faire exécuter au bras robotique un déplacement en diagonal que droit devant. Or, de nombreux travaux neuroscientifiques (Siegel & White, 1975 ; Proffitt *et al.*, 2003) ont révélé que les caractéristiques de l'acte moteur sont des facteurs critiques dans la construction de la représentation spatiale. Il apparaît en particulier que plus la complexité ou l'effort pour exécuter un mouvement est élevé, plus les distances sont jugées importantes (Kosslyn *et al.*, 1974 ; Cohen *et al.*, 1978 ; Cohen & Weatherford, 1980). D'où, l'augmentation du Pi pour les rayons latéraux pourrait bien être causée par cette difficulté de commande qui vient se rajouter au processus d'assimilation précédemment décrit et, ainsi, expliquer pourquoi le pattern en « V » et le Pi total ne sont pas identiquement soumis aux mêmes effets. En définitive, ceci nous permet donc de déduire que l'anisotropie spatiale de la performance doit aussi être dû, pour une part, aux particularités de l'interface de contrôle employée (Zhai *et al.*, 1997).

## **V. Modulation de l'excentricité de la caméra par rapport au bras**

De l'expérience précédente, il ressort qu'il existe des signes évidents d'appropriation du système de téléopération par l'opérateur, lorsque ce dispositif est configuré suivant une relation caméra-bras anthropomorphique. Aussi, la question qui s'élève maintenant est de savoir si le respect d'une telle configuration est fondamental pour parvenir à l'appropriation ou si l'opérateur humain peut passer outre cette architecture, ce qui révélerait encore davantage son potentiel de déformabilité représentationnelle. Une telle interrogation est bien loin d'être triviale. En effet, il est important d'insister sur le fait que nos expérimentations diffèrent fondamentalement des autres travaux s'intéressant à l'étude de l'espace péripersonnel, par la présence d'un écart physique entre l'outil d'action (le bras MANUS) et celui qui le contrôle. Les seuls travaux ayant souligné la singularité de cette situation d'écart sont ceux de Maravita *et al.* (2001), mais, contrairement aux nôtres, il travaille dans l'instant et néglige ainsi l'importance de la dimension temporelle dans l'instauration de cette relation « étrange » qui unit l'homme à son outil.

Aussi, sur ce domaine de la relation à distance les résultats les plus novateurs viennent certainement des travaux d'Iriki *et al.* (2001). Dans leurs études, ces auteurs n'ont pas travaillé sur un outil à proprement parler, mais sur une projection sur un moniteur vidéo, particularité partagée avec une situation de téléopération. L'expérience a consisté à entraîner

des singes à reconnaître l'image de leur main sur un écran de moniteur. Avant l'entraînement, aucun neurone ne répondait aux stimuli visuels présentés autour de l'image de leur main sur l'écran. En revanche, immédiatement après que le singe ait appris à reconnaître sa propre image dans le moniteur, un groupe de neurones s'active par la formation d'un nouveau champ récepteur autour de l'image télévisuelle de la main. Des observations relativement similaires ont également pu être recueillies chez l'homme. Une étude portant sur un patient ayant une extinction tactile a montré que, lorsque le sujet observe dans un miroir situé dans son espace lointain un flash lumineux délivré à proximité de sa main, l'effet obtenu est identique à celui produit par une lumière qui est directement perçue proche de la main dans l'espace péripersonnel (Maravita *et al.*, 2000). D'où, voir sa propre main via un miroir active une représentation de l'espace péripersonnel entourant la main, et non pas une représentation de l'espace extrapersonnel suggérée par la distance à laquelle se trouve le miroir.

Ce que mettent en exergue ces deux expériences, et en particulier la première, c'est que le remodelage de l'espace extrapersonnel en espace péripersonnel prend place lorsque le sujet parvient à reconnaître la main apparaissant à l'écran. Ainsi, la reconnaissance d'un organe ou plus généralement l'identification à un organe semble constituer une étape importante dans l'allongement du schéma corporel quand la situation est spatialement discontinue. Cette découverte, lorsqu'on la ramène à notre contexte de téléopération, ne fait finalement que confirmer l'importance d'étudier avec soin l'impact d'une représentation robotique de type humain sur la possible appropriation du robot par son utilisateur. Celle-ci est appréhendée à partir d'une échelle graduelle d'anthropomorphie, c'est-à-dire que les conditions expérimentales correspondront à des degrés progressifs de déformation de la relation vision-manipulation par rapport à la morphologie humaine. L'avantage d'une telle démarche est qu'elle nous permettra d'identifier la tolérance qu'il est possible de s'accorder vis-à-vis du modèle humain mais, surtout, l'éventuel point de rupture à ne pas atteindre. L'hypothèse que nous émettons est que plus la configuration de l'ensemble caméra-bras robotique s'apparente à une architecture morphologique de type humaine, plus l'appropriation devrait être élevée.

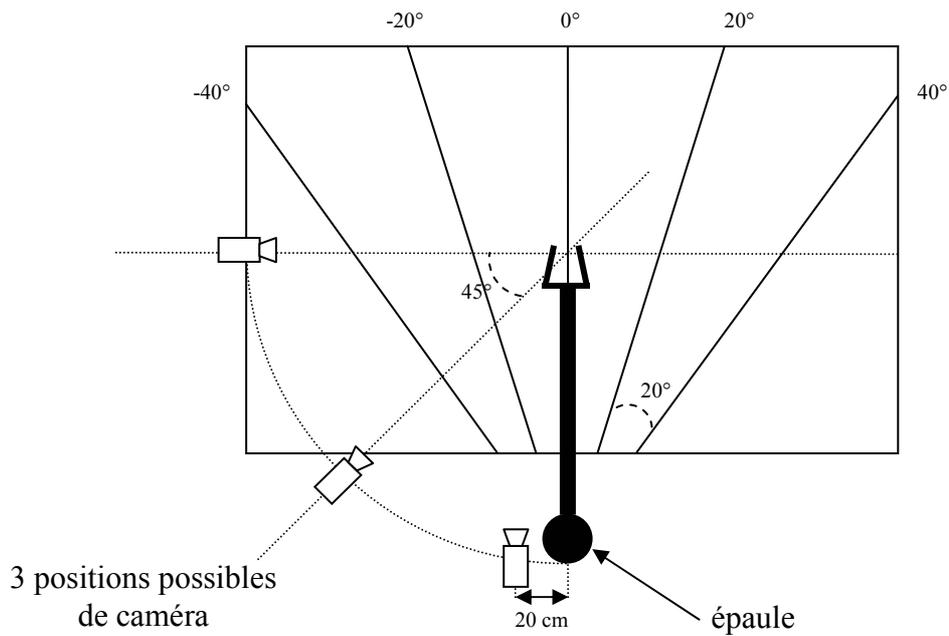
## **V.1. Protocole expérimental**

### V.1.1. Sujets

Seize sujets au total, âgés entre 25 et 30 ans ont participé à cette seconde expérience. Ces individus se répartissaient équitablement en quatre groupes indépendants, c'est-à-dire un pour chaque condition expérimentale. Parmi ces quatre conditions, trois correspondaient à une situation de téléopération pour laquelle la position relative de la caméra par rapport au bras était variable, et la dernière était une condition naturelle identique à la manipulation précédente. Les sujets possédaient tous une vue normale ou utilisaient des verres correcteurs leur assurant une bonne vision. Les différentes localisations de la caméra étant toujours situées à gauche du robot, c'est une population de droitiers qui a encore été choisie. Enfin, tous ces participants étaient naïfs quant aux objectifs de l'expérimentation. Cette dernière les aura occupé environ une heure par jour sur quatre jours, constituant ainsi une quotité horaire totale de quatre heures par sujet.

### V.1.2. Conditions

Ici, trois conditions de téléopération ont été comparées entre elles et par rapport à une condition naturelle. L'intérêt de tester à nouveau la saisie avec le bras humain est double. Tout d'abord, elle nous apporte la valeur référence permettant d'évaluer le niveau d'appropriation. Deuxièmement, cela donne une information sur la reproductibilité des résultats obtenus précédemment et ainsi renseigner sur le degré de confiance que l'on peut porter à cet indice. Pour l'ensemble des conditions de téléopération testées, les sujets sont placés dans les mêmes conditions matérielles de contrôle et de supervision qu'à la première manipulation. Ainsi, ils se retrouvent dans une situation de vision indirecte. On rappelle que celle-ci s'effectue à travers une caméra mobile, de 50° de champ optique horizontal et 38° de vertical, projetant des images sur un écran moniteur de 31 cm de haut sur 23 cm de large. Le contrôle du bras est réalisé également par l'intermédiaire d'une liaison CAN assurant la connexion entre le PC de commande et le robot.



**Figure 25 :** Détails des caractéristiques du dispositif expérimental en vue de dessus.

Dans les trois conditions téléopérées, la position du bras robotique ne change jamais, seule la localisation relative des caméras par rapport à lui évolue (figure 25). Cette position, relativement à la table expérimentale, est quasiment identique à celle qu'il occupait à l'expérience précédente. Ainsi, son axe de rotation de l'épaule est aligné sur la médiane de la longueur de la table. La seule différence est que le centre de cet axe est situé en retrait d'une vingtaine de centimètres par rapport au bord antérieur de la table. Une telle particularité n'a aucun caractère scientifique mais possède un attrait purement fonctionnel en facilitant le placement des caméras. Là encore, c'est depuis cet axe qu'irradient les cinq rayons, séparés successivement entre eux d'un angle de  $20^\circ$ , s'étendant sur un secteur angulaire allant de  $-40^\circ$  à  $40^\circ$ .

Les trois conditions de téléopération correspondent donc à trois positions différentes de caméra. Celles-ci ont la particularité de partager le fait d'être placées à équidistance vis-à-vis du centre de la table. Elles sont ainsi disposées sur un cercle virtuel dont le rayon est égal à la moitié de la longueur de la table. D'où, seule la localisation angulaire au niveau de ce cercle va les distinguer. Comme précédemment, dans la condition anthropomorphe la caméra étant à une vingtaine de centimètres à la gauche du bras et légèrement en arrière, sa position est d'environ  $15^\circ$  par rapport à l'axe 0 du robot (lequel est confondu avec le rayon  $0^\circ$  ou axe médian de la table). Dans la seconde condition d'excentricité, aussi appelée condition « biais », la caméra est placée à un angle un peu plus conséquent, puisqu'il est de  $45^\circ$  en

regard de l'axe 0. Enfin, l'ultime caméra est positionnée perpendiculairement à l'axe antéro-postérieur du bras, rompant ainsi toute identité morphologique avec le modèle humain. Cette dernière configuration est nommée condition « côté ». Pour terminer, en ce qui concerne les caractéristiques de la condition naturelle, elles sont rigoureusement similaires à celles de l'expérience 1, à savoir que l'axe de rotation de l'épaule humaine est confondu avec celui de l'épaule du MANUS.

### V.1.3. Procédure

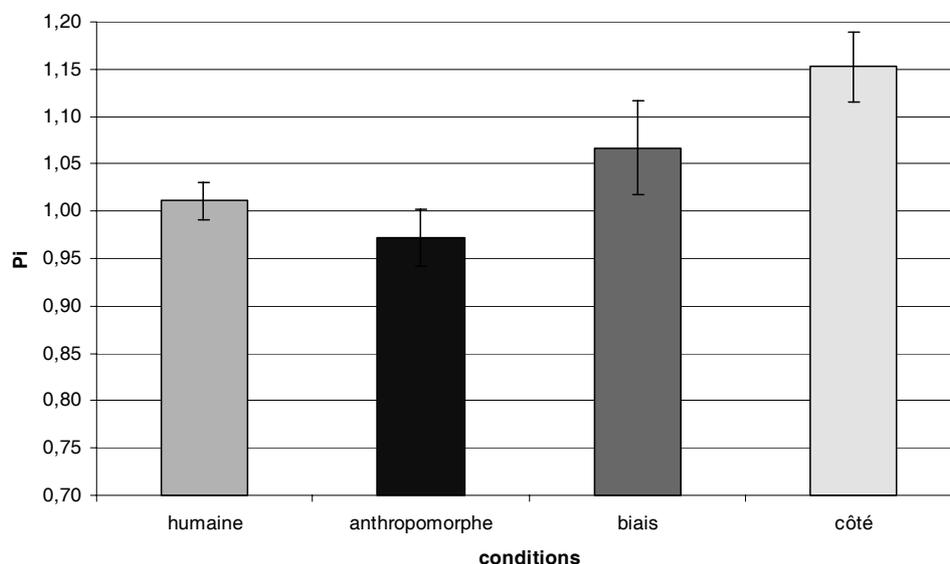
La procédure expérimentale suivie lors de cette dernière expérience est similaire à celle de la précédente. Ainsi, on observe également une décomposition en trois phases. Dans une première étape le sujet s'attache à tenter de saisir l'objet cylindre à l'aide de son bras droit ou du bras robotique selon la condition. Quatre distances différentes de position du cylindre sont testées pour chaque rayon. Certaines de ces positions sont atteignables par simple extension du bras et d'autres ne le sont pas. La consigne qui est donnée au sujet est de saisir l'objet le plus rapidement possible, tout en ayant le taux de réussite le plus élevé possible.

Suite à cette partie, s'enchaîne l'inévitable phase de calibration. La tâche du sujet est de prendre le cylindre entre le pouce et l'index ou de le saisir dans la pince, puis de le placer le plus loin possible en allongeant le bras, en veillant bien à ne pas décoller le dos de la chaise pour les sujets de la condition naturelle. Puis, l'expérimentateur relève cette longueur référence (R) correspondant au rayon effectif de l'espace péripersonnel et constituant la valeur dénominateur permettant le calcul du ratio Pi. Cette séquence d'action est réalisée pour chaque rayon et à chaque nouvelle session expérimentale.

Enfin, la recherche du seuil de détection par le sujet de sa distance de saisie clôture l'évaluation de chaque rayon, lesquels sont testés dans un ordre randomisé d'une session à l'autre. Pour cela, une technique de seuillage identique à celle de l'expérience 1 a été employée (figure 20). Nous avons utilisé les huit mêmes positions (quatre infraliminales et quatre supraliminales) centrées autour de la longueur référence (R). Toujours afin d'obtenir un niveau élevé de précision dans la valeur du seuil, les huit positions ont été testées dix fois chacune. La tâche du sujet était encore de répondre par « oui » ou « non » à la question : « Pouvez-vous saisir l'objet présenté par simple extension du bras ? ». Et c'est pour le pourcentage de réponse affirmative égal à 50% que nous avons identifié la longueur seuil (S) correspondante. Puis, une fois cette longueur seuil (S) rapportée sur la longueur référence (R), l'indice Pi a enfin pu être obtenu.

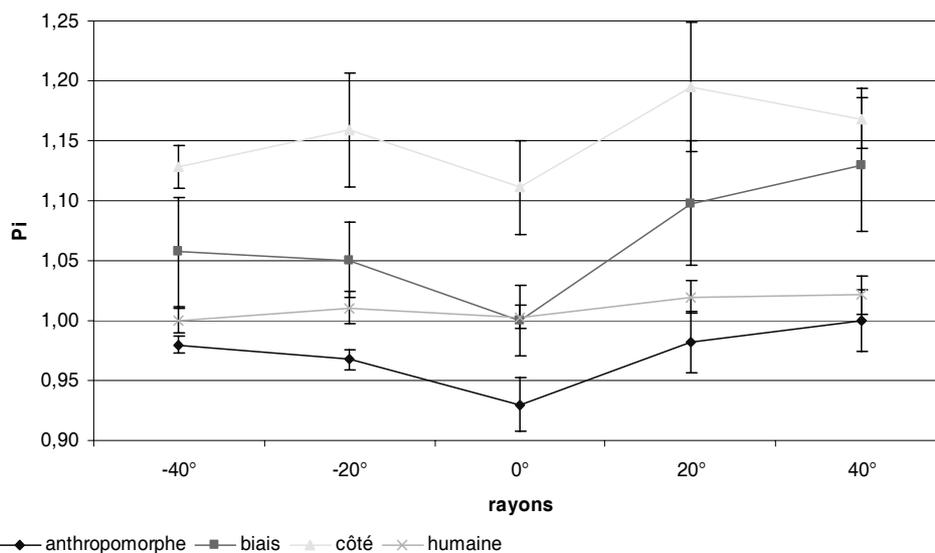
## V.2. Résultats

Tel qu'il est montré sur la figure 26, la valeur  $P_i$  d'évaluation de la distance de saisie par extension du bras n'est pas la même selon les conditions de téléopération ( $F [2, 9] = 9,05$  ;  $p < 0,007$ ). D'où, leur identité par rapport au  $P_i$  humain diffère également entre-elles. Ainsi, le  $P_i$  de la configuration anthropomorphe ne s'avère pas statistiquement différent de celui de la condition naturelle ( $F [1, 6] = 2,48$  ; NS). Ce résultat confirmant les données obtenues à la précédente expérience, vient prouver définitivement la similarité de précision entre la délimitation du schéma corporel naturel et celui de la condition anthropomorphe. Mais, la configuration anthropomorphe n'est pas la seule à exhiber une différence de valeur de  $P_i$  non significative par rapport au référentiel humain, puisque la condition biais l'est aussi ( $F [1, 6] = 2,56$  ; NS). A noter, cependant, que cette identité  $P_i$  humain/ $P_i$  biais est due, en partie, au fort écart-type de la condition biais ( $s = 0,1$ ), lequel est supérieur à celui enregistré en condition anthropomorphe ( $s = 0,06$ ). En revanche, la configuration côté est la seule qui diffère statistiquement de la condition naturelle ( $F [1, 6] = 16,8$  ;  $p < 0,006$ ), cet écart entre les deux étant conservé jusqu'à la dernière session expérimentale ( $F [1, 6] = 10,12$  ;  $p < 0,02$ ).



**Figure 26 :** Valeur de l'indice  $P_i$  d'évaluation de la distance de saisie selon chacune des conditions expérimentales.

En ce qui concerne l'estimation de la distance de saisie en fonction des rayons considérés, on retrouve un effet similaire à celui observé à l'expérience 1. Ainsi, les deux conditions dont le Pi ne diffère pas statistiquement du Pi naturel présentent un effet de rayon (figure 27). Précisément, pour la configuration anthropomorphe ( $F [4, 12] = 3,49$  ;  $p < 0,04$ ) comme pour la configuration biais ( $F [4, 12] = 3,73$  ;  $p < 0,04$ ), on constate une valeur du Pi significativement plus basse pour les rayons centraux par rapport aux rayons latéraux. Cette courbe en « V » a déjà été interprétée en temps que marqueur d'une transposition de la représentation mentale du bras humain sur le bras robotique et ne fait donc que confirmer nos présomptions d'attribution à la machine des caractéristiques physiques de l'opérateur. Néanmoins, il est à remarquer que ce pattern en « V » présente une symétrie plus régulière dans le cas anthropomorphe que dans le cas biais, signe que cette transposition semble s'effectuer plus naturellement en condition anthropomorphe que biais.



**Figure 27 :** Valeur de l'indice Pi suivant les rayons, pour les quatre conditions expérimentales.

### V.3. Discussion

La présente expérience a consisté à évaluer l'influence de la position de la caméra par rapport au bras manipulateur sur la capacité d'appropriation du système de téléopération par l'opérateur humain. Ceci a été rendu possible grâce à la comparaison entre différentes configurations caméra/bras établies selon une échelle progressive d'anthropomorphie. Ainsi,

trois localisations relatives de caméra ont été testées. La condition *anthropomorphique* pour laquelle la relation anthropométrique unissant la position des yeux à celle de l'épaule est grossièrement respectée. La condition *biais* où la caméra observe un décalage latérale de 45° d'arc vis-à-vis de l'axe antéro-postérieur du robot. Et enfin, dans la situation de *côté* l'excentricité de la caméra est encore plus conséquente, puisque située à la perpendiculaire de l'axe de rotation 0° du bras. Ces trois configurations matérialisent donc bien respectivement des niveaux décroissants dans le respect de l'anthropométrie humaine.

Les résultats montrent, dans un premier temps, que seules les conditions anthropomorphiques et biais fournissent une précision dans la délimitation de l'espace de saisie qui ne diffère pas significativement d'avec la condition naturelle, où le sujet doit juger des limites d'atteinte de son propre bras. Cette donnée est d'autant plus fondamentale qu'elle vient confirmer, en ce qui concerne la configuration anthropomorphique, les résultats de la précédente expérience. Cela nous permet ainsi de soutenir plus fortement encore l'hypothèse d'une incorporation du robot manipulateur configuré anthropomorphiquement dans l'espace péricorporel de son utilisateur. Il semble, cependant, que cette extension du schéma corporel présente certaines limites, notamment lorsque la relation organe visuel/organe effecteur est trop déformée pour que l'opérateur puisse s'identifier à la configuration en question. C'est le cas pour la condition de côté, où l'opérateur éprouve de réelles difficultés à se représenter les capacités du bras.

L'importance de la reproduction des rapports de longueur humains au niveau de la machine peut aisément se comprendre au vu des connaissances développementales de la motricité de l'enfant. En effet, on sait que l'individu construit depuis son plus jeune âge une appréciation perceptive du monde et des capacités de son propre corps principalement à partir de ses caractéristiques anthropométriques (Ledebt, 2001). Par exemple, il a été montré chez des enfants de 6 à 10 ans que plus ceux-ci sont grands, en valeurs absolues, plus la limite d'enjambement des obstacles est élevée, alors qu'en termes de valeurs relatives, la limite d'enjambement reste égale à 88% de la longueur de la jambe, indépendamment de l'âge (Pufall & Dunbar, 1992). De telles particularités ne s'observent pas uniquement lors de l'exécution d'une activité motrice, mais aussi sur un plan purement perceptif. Ainsi, Warren (1987) a démontré que le seuil d'estimation visuelle de la largeur minimale pour le passage à travers une porte est basé sur la hauteur relative des yeux par rapport au reste du corps. Cette hauteur relative du regard semble également impliquée dans notre capacité à évaluer les distances (Ooi *et al.*, 2001). D'où, puisque les propriétés perceptivo-motrices de l'organisme sont issues d'une longue calibration élaborée sur les bases des relations métriques entre les

divers segments du corps, ceci explique donc l'avantage stratégique de conserver de telles relations au niveau du système de téléopération, afin que l'opérateur puisse y retrouver des proportions connues et ainsi faciliter une éventuelle appropriation de la machine.

Une seconde caractéristique des résultats obtenus est de révéler une augmentation croissante du facteur Pi plus l'architecture du dispositif s'éloigne d'une configuration anthropomorphique, pour atteindre en particulier une valeur largement supérieure à 1 en condition côté. Etant donné qu'à l'expérience précédente nous avons abouti à la conclusion que les variations du Pi étaient dues à un défaut d'appréciation des capacités d'extension du bras robotique, il apparaît donc dans le cas présent que plus l'opérateur a une vision excentrée sur le côté et vers l'avant, plus ce dernier tend à surestimer la longueur du bras. Un tel phénomène peut s'expliquer par le fait qu'une perturbation artificielle de la position du référentiel visuel de l'homme entraîne un réarrangement de la représentation du corps. En effet, des travaux en RV (Biocca & Rolland, 1998) ont montré qu'un déplacement vers l'avant de la position « virtuelle » des yeux d'un sujet se traduit par une surestimation de la distance d'atteinte du bras. L'interprétation donnée à ce résultat est que cette situation crée une discoordination entre l'espace visuel et l'espace moteur, dont l'élévation croissante du décalage engendre un biais perceptivo-moteur linéairement corrélé (Pennel *et al.*, 2002 ; Pennel *et al.*, 2003). Il en est de même en ce qui concerne notre configuration expérimentale car, que ce soit pour la condition biais et, encore d'avantage, pour la condition côté, les coordonnées visuo-motrices sont fortement perturbées par rapport au modèle humain. Ainsi, on peut penser que la position avancée de la caméra vis-à-vis de l'épaule du robot tend l'opérateur à se représenter cet axe de rotation dans une position plus antérieure, puisque celui-ci est normalement aligné avec le référentiel oculaire en condition naturelle. Ceci expliquerait la surestimation de la longueur d'extension du bras. De plus, le décalage visuel sur le côté pourrait contribuer à amplifier ce phénomène, en renvoyant au sujet des proportions corporelles majorées et donc un allongement du bras en conséquence.

En définitive, ces premiers résultats tendraient à montrer que concevoir le système de télémanipulation selon une architecture structurale de type humaine semble la solution la plus pertinente pour permettre à l'opérateur de s'approprier la machine. Du moins, et à l'inverse, ces données sont suffisamment convaincantes pour démontrer qu'il faut éviter des configurations caméra/robot qui s'éloignent exagérément des relations morphologiques œil/bras propre à l'homme. En effet, cette expérience a le mérite de révéler que le phénomène d'appropriation déjà enregistré lors de la manipulation précédente, et confirmé ici, ne s'instaure pas systématiquement quelle que soit l'organisation architecturale du dispositif de

téléopération. Ainsi, il semble devoir être important de respecter une certaine anthropométrie, même si celle-ci n'est pas rigidement déterminée dès le départ, afin que l'opérateur puisse s'appropriier le système – du moins, à l'échelle de temps sur laquelle nous avons travaillé.

Cependant, l'analyse du pattern spatial de l'indice Pi met également en évidence qu'en plus d'engendrer un phénomène d'appropriation, les situations qui se rapprochent le plus d'une configuration anthropomorphique forcent l'opérateur à effectuer une projection de soi sur le robot. En effet, la figure 27 montre que les valeurs du Pi selon les rayons testés passent clairement d'un pattern en « V », signature de cette projection, pour les configurations de type humaine, à une représentation beaucoup plus erratique pour les autres. En cela, ces dernières observations confirment bien notre hypothèse de départ, à savoir qu'en situation anthropomorphique l'opérateur tend à privilégier les processus d'appropriation basés selon des mécanismes assimilatoires au détriment de processus d'accommodation, lesquels étant pourtant également indispensables. D'où, le dilemme reste encore entier pour l'ingénieur concepteur. Doit-il miser sur une anthropomorphie en s'assurant ainsi d'une assimilation relativement spontanée du système, mais au risque que l'opérateur n'effectue pas les accommodations nécessaires à la bonne appropriation de celui-ci, ou doit-il parier sur la stratégie inverse ? Pour répondre définitivement à cette interrogation il est maintenant important de passer à l'analyse de la dynamique de l'action de saisie du robot.

## **VI. Analyse de la dimension motrice du contrôle à distance**

Le couple perception-action est considéré comme parfaitement uni et indissociable par les psychologues, en particulier ceux de la tradition écologique, tandis que de nombreuses évaluations relevant de la psychologie expérimentale ou cognitive, de même qu'en neuropsychologie, suggèrent qu'un divorce du couple est incontournable. On rencontre, en particulier, de nombreux signes de cette dissociation dans le cas des illusions d'optique. Par exemple, dans une expérience d'Aglioti *et al.* (1995) des jetons de tailles physiques réellement différentes sont perçus comme identiques. La tâche qui est demandée au sujet est de saisir les jetons entre le pouce et l'index. De façon surprenante, ces auteurs observent que l'écartement entre ces deux doigts est déterminé par la taille réelle des jetons plutôt que par leur taille illusoire. Dans une autre étude, la même équipe a comparé cet ajustement sensori-moteur de la taille de la pince digitale à une condition d'appariement dans laquelle les sujets devaient indiquer la taille du jeton sans diriger leur main vers lui (Haffenden et Goodale, 1998). L'effet de l'illusion sur cet appariement était similaire à celui obtenu précédemment

dans la condition purement perceptive. Enfin, dans des travaux en relation plus directe avec notre étude, Pagano et Bingham (1998) ont mis en évidence une absence de corrélation entre un jugement verbal et moteur de la perception monoculaire des distances. De tels résultats prouvent qu'on ne peut se limiter à une évaluation perceptive et donc qu'une mesure de l'acte moteur s'impose pour apprécier le réel niveau d'appropriation du système par l'opérateur humain.

Pour évaluer cette dimension motrice, différentes natures de paramètres sont à notre disposition. En s'appuyant sur les travaux de Viviani et Schneider (1991), nous avons déjà pu les regrouper en deux niveaux d'analyse distincts : le phénoménologique et le comportemental. Rappelons brièvement que le niveau phénoménologique recouvre la performance brute, c'est-à-dire celle qui est instantanément observable par simple mesure directe. Classiquement, dans les expériences qui vont suivre, les critères d'évaluation de ce niveau d'analyse seront de deux natures. Le premier de ces critères est le taux de réussite dans l'exécution de la tâche. Concrètement, puisqu'il s'agira de tâches de saisie d'objet, le *taux de réussite* sera le nombre de fois que l'opérateur parvient à prendre l'objet avec la pince du bras robotique rapporté au nombre total de tentatives. Le second paramètre phénoménologique correspond au *temps moyen d'exécution du mouvement*. Là encore, il s'agit d'une observation purement quantitative, puisqu'elle permet de donner un ordre de valeur sur la rapidité d'accomplissement de l'action. Ces deux critères renseignent donc sur le couplage vitesse/précision fournissant ainsi des informations complémentaires. Cependant, tel qu'il a déjà été souligné en introduction, si ces critères permettent bien dans un premier temps de donner une estimation des conditions dans lesquelles l'opérateur se sent le plus à l'aise, ils ne peuvent guère en dire davantage sur la nature de cette satisfaction. Pour atteindre l'étage causal, il est nécessaire de faire appel à des indices d'analyse plus fins, portant sur les processus comportementaux sous-tendant le phénomène observable.

Il y a généralement deux caractéristiques principales qui permettent de distinguer les critères d'évaluation des processus comportementaux des critères d'évaluation phénoménologiques. Tout d'abord, l'analyse des processus comportementaux se fait rarement à partir des mesures brutes. Elle provient plutôt d'une computation de données réalisée selon un modèle arithmétique. Deuxièmement, cette computation est effectuée à des fins de comparaison avec un modèle comportemental. Si la première caractéristique n'est pas toujours respectée, la seconde l'est systématiquement. De plus, étant donné que ces paramètres font référence à un degré d'explication beaucoup plus élevé que les précédents, à un niveau où les processus comportementaux se subdivisent eux-mêmes en de multiples

processus sous-jacents, l'éventail des critères d'évaluation sera lui aussi beaucoup plus important qu'au niveau phénoménologique. Ainsi, pour notre situation de télémanipulation, les critères comportementaux ont été regroupés en deux grandes classes, suivant le type de processus qu'ils évaluent. Il s'agit soit de critères d'évaluation de la dynamique d'exécution du mouvement, soit d'identification de la coordination motrice des segments du bras.

Tel que nous l'avons mentionné auparavant, l'appropriation ne se limite pas à une modification des représentations mentales, mais passe aussi par une adaptation des schèmes moteurs de l'opérateur. Ainsi, le pattern d'exécution du mouvement robotique va constituer un bon marqueur dynamique pour identifier la manière dont le sujet s'approprie le bras téléopéré. Ici, l'évaluation de l'appropriation est basée sur une comparaison entre la performance du téléopérateur et celle qu'il réalise en condition naturelle. D'où, pour effectuer ce comparatif, nous nous appuyons sur les connaissances neuroscientifiques concernant les mouvements de préhension, qui sont très développées en la matière (Jeannerod, 1988 ; Desmurget *et al.*, 1998 ; Meyer *et al.*, 1988). En première approche, on peut délibérément faire abstraction de la complexité biomécanique pour s'intéresser aux déplacements de la seule extrémité distale de l'effecteur mobilisé. Cette stratégie a un double intérêt. Premièrement, elle permet une analyse comparative de la performance télérobotique et de la performance naturelle sur une partie effectrice qui est directement comparable entre les deux conditions. Deuxièmement, elle se concentre sur l'élément qui, après l'achèvement de la phase de transport des différents segments effecteurs, va participer à la réalisation de la tâche de la manière la plus directe. Ainsi, pourra-t-on réduire le mouvement de l'ensemble des segments à la cinématique de la trajectoire de la main (ou de la pince, pour le robot), conformément à l'idée selon laquelle nous choisissons et planifions nos mouvements sur la base de leurs effets externes, et non en termes de rotation des articulations ou de raccourcissement et d'allongement des muscles (Morasso, 1981 ; Abend *et al.*, 1982).

En s'inspirant d'une étude de Magenes *et al.* (1992), qui constitue un travail relativement pionnier dans la quête d'une unification entre neurosciences et télérobotique, l'évaluation de la trajectoire de l'extrémité distale de l'effecteur va porter sur un critère essentiel, l'*erreur spatiale (S)*. Celle-ci se définit comme l'écart existant entre la trajectoire idéale (une ligne droite dans nos conditions expérimentales), depuis le point de départ du mouvement jusqu'à l'atteinte de l'objectif, et la trajectoire réellement exécutée par le robot. Concrètement, cette erreur correspond au rapport de la distance réalisée par le robot (R) sur la distance théoriquement la plus courte (T), tel que :  $S = R/T$ . En partant du principe neuroscientifique qu'un mouvement orienté vers une cible présente une trajectoire

relativement droite (Morasso, 1981), plus S tendra vers 1, plus le mouvement sera considéré comme fidèle au modèle humain.

Cependant, l'analyse de la cinématique de la trajectoire ne suffit à rendre compte de toutes les dimensions de l'organisation d'un mouvement de saisie. Notamment, elle ne révèle pas la complexité de coordination nécessaire entre les différents segments de l'effecteur, laquelle est bien supérieure à celle qui s'opère lors d'un simple mouvement de pointage (Jeannerod, 1988). L'action de saisie d'un objet est le résultat de mouvements simultanés de plusieurs articulations, pour transporter la main vers l'objet, orienter le poignet et préouvrir les doigts dans une taille appropriée. Aussi, pour l'accomplissement d'une telle action, le contrôle des nombreux degrés de liberté du bras et de la main est rendu possible par le fait que les mouvements des différentes articulations tendent à covarier. Par exemple, on a remarqué que l'altération du mouvement d'atteinte (i.e., en modifiant la distance de l'objet) affecte également la préouverture de la main (Jakobson & Goodale, 1991 ; Chieffi & Gentilucci, 1993). Réciproquement, l'altération de l'ouverture manuelle (i.e., en changeant la taille de l'objet) modifie la cinématique de l'atteinte (Marteniuk *et al.*, 1990 ; Gentilucci *et al.*, 1991 ; Jakobson & Goodale, 1991 ; Bootsma *et al.*, 1994). Bien qu'étant de relativement faibles amplitudes, ces modulations peuvent être considérées comme le reflet des mécanismes de coordination sous-jacents entre les différents mouvements articulaires.

De l'ensemble de ces observations, il apparaît que le mécanisme de coordination le plus critique dans une tâche de saisie est celui qui unit la progression du bras à l'ouverture de la main. C'est ce qu'on nomme communément la coordination entre la composante de transport et la composante de manipulation d'un geste de préhension. Au vu des caractéristiques du bras robotique utilisé, deux variables s'avèrent pertinentes à étudier dans le cadre de cette coordination transport/manipulation. La première est simplement l'observation de la capacité de l'opérateur à pouvoir commander simultanément l'avancée du bras et l'ouverture de la pince pour parvenir à la saisie de l'objet. Sachant que, chez l'homme, la coordination de ces deux composantes est reflétée par une synchronisation dans le changement de leur cinématique respective (Jeannerod, 1984), plus le *nombre d'occurrences de simultanéité* sera élevé plus le niveau d'appropriation sera jugé important car, rappelons-le, nos critères d'évaluation de l'appropriation sont liés à la similarité entre le pattern robotique et le pattern humain. Enfin, la seconde variable est le timing dans le *déclenchement de l'ouverture de la pince*. Il a été montré que, lors d'un mouvement de préhension, l'écartement de la main s'établit au début de la phase de transport, signifiant donc une nette anticipation vis-à-vis de la prise de l'objet en elle-même (Jeannerod, 1984). Ainsi, dès l'enclenchement du

déplacement du bras les doigts commencent à s'étendre, atteignant rapidement une ouverture maximale. D'où, pour notre évaluation expérimentale, une telle précocité dans l'ouverture de la pince pourra s'interpréter par le fait que l'opérateur assimile le bras robotique comme étant une extension de son propre bras.

## **VI.1. Protocole expérimental**

### VI.1.1. Sujets

Un total de seize sujets âgés entre 25 et 30 ans a participé à cette expérience. Ces individus étaient répartis en trois groupes indépendants. Pour chacun de ces groupes le sujet était toujours placé en situation de téléopération, seule la localisation relative de la caméra par rapport au bras permettant de distinguer les conditions entre-elles. Les individus possédaient tous une vue normale ou utilisaient des verres correcteurs leur assurant une bonne vision. Etant donné que les différentes positions de caméra étaient encore situées à gauche du robot, c'est toujours une population de droitier qui a été choisie. L'ensemble des participants était naïf quant aux objectifs de l'expérimentation. Celle-ci aura durée environ une demi-heure par jour répétée sur quatre jours, constituant ainsi un total de deux heures de manipulation par sujet.

### VI.1.2. Conditions

Dans cette expérience, trois conditions de téléopération ont été comparées entre elles. Pour l'ensemble de ces situations, les sujets sont placés dans les mêmes conditions matérielles de contrôle et de supervision que pour les précédentes manipulations. Ainsi, ils se retrouvent toujours dans une position de vision indirecte. Celle-ci s'effectue à travers une caméra mobile, de 50° de champ optique horizontal et 38° de vertical, projetant des images sur un écran moniteur de 31 cm de haut sur 23 cm de large. Le contrôle du bras est réalisé par l'intermédiaire d'une liaison CAN assurant la connexion entre le PC de commande et le robot.

La position du bras robotique conserve la même place pour les trois conditions, seule la localisation relative de la caméra par rapport à lui évolue. Cette position, relativement à la table expérimentale, est rigoureusement identique à celle qu'il occupait à l'expérience précédente. Ainsi, l'axe de rotation de l'épaule est aligné sur la médiane de la longueur de la

table. Là encore, c'est depuis cet axe qu'irradient les cinq rayons, séparés successivement entre eux d'un angle de 20°, s'étendant sur un secteur angulaire allant de -40° à 40°.

Les trois conditions de téléopération correspondent donc à trois positions différentes de caméra. Celles-ci sont placées à équidistance vis-à-vis du centre de la table. Elles sont ainsi disposées sur un cercle virtuel dont le rayon est égal à la moitié de la longueur de la table. D'où, seule la localisation angulaire au niveau de ce cercle va les distinguer. Dans la condition anthropomorphe la caméra étant à une vingtaine de centimètres à la gauche du bras et légèrement en arrière, sa position est d'environ 15° par rapport à l'axe 0 du robot. Dans la condition biais, la caméra est placée à un angle de 45° en regard de l'axe 0. Enfin, pour la condition côté la caméra est positionnée perpendiculairement à l'axe antéro-postérieur du bras. La figure 25 de la section V.2.2 fournit une représentation visuelle de ce dispositif.

### VI.1.3. Procédure

La tâche du sujet est de tenter de saisir l'objet cylindrique à l'aide du bras robotique. Pour cela quatre distances différentes de position du cylindre sont testées pour chaque rayon. Trois de ces positions sont atteignables par simple extension du bras et une ne l'est pas. La consigne qui est donnée au sujet est de saisir l'objet le plus rapidement possible, tout en ayant le taux de réussite le plus élevé possible. Si on impose une telle consigne c'est qu'à la différence des deux précédentes manipulations, on enregistre ici les caractéristiques des mouvements du bras, pour isoler des marqueurs dynamiques témoins d'un phénomène d'appropriation. L'enregistrement débute au départ du mouvement et s'arrête lorsque l'objet est pris entre le pouce et l'index du sujet ou la pince du robot. Aussi, afin que ces données aient un sens, les diverses positions d'objet sont définies avec précision, de même que le point de départ de l'extrémité du bras qui est toujours initié à une place identique, aligné sur le rayon où se trouve le cylindre.

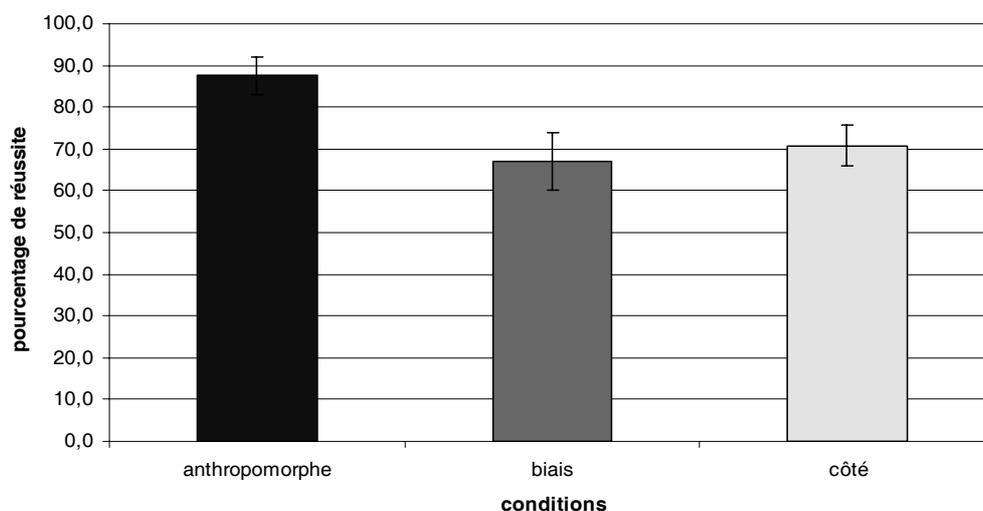
Cette expérience diffère des deux précédentes par la nature dynamique des marqueurs servant à analyser la capacité d'appropriation que l'opérateur développe vis-à-vis du bras robotique. Le premier de ces marqueurs concerne la cinématique du déplacement de l'extrémité distale du bras. Précisément, il s'agit de l'erreur spatiale (S) qui se calcule en rapportant la distance réalisée par le robot (R) sur la distance théorique la plus courte (T) entre le point de départ du mouvement et la position de l'objet, tel que :  $S = R/T$ . Ainsi, plus « S » est grand plus l'erreur spatiale est importante, ce qui témoigne d'une difficulté dans la maîtrise du bras. Enfin, le second paramètre concerne la coordination motrice entre la

commande du bras et de la main, laquelle constitue une caractéristique première du geste de saisie. Aussi, on va s'attacher à évaluer les capacités de l'opérateur à contrôler simultanément le mouvement du bras et de la main, ainsi que la phase d'initiation de cette synchronie dans le déroulement temporel du geste. A rappeler que l'interprétation de ces résultats dynamiques ne se fera que par comparaison indirecte avec les données de la littérature.

## VI.2. Résultats

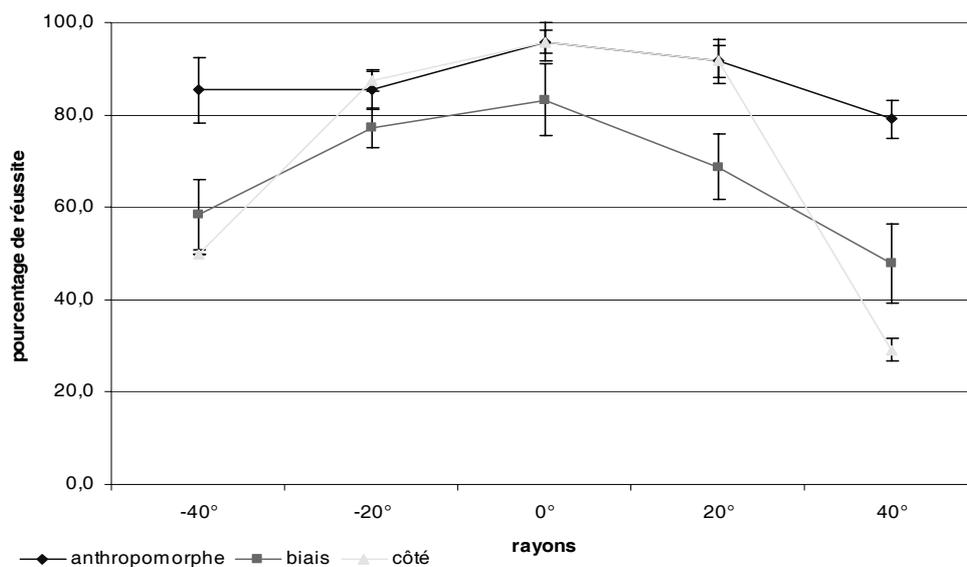
### VI.2.1. Taux de réussite

Le premier résultat montre une augmentation significative du nombre d'objets ayant été saisis avec succès au fil des sessions ( $F [3, 27] = 10,09 ; p < 0,0001$ ). Cet effet de session dénote une adaptation progressive de l'opérateur vis-à-vis du système. Cependant, le niveau total de performance atteint diffère selon la condition de téléopération ( $F [2, 9] = 18,96 ; p < 0,0006$ ). Ainsi, telle que l'illustre la figure 28, les opérateurs placés dans la configuration anthropomorphe ont un pourcentage de saisie statistiquement plus élevé par rapport aux deux autres ( $F [1, 6] = 22,58 ; p < 0,004$ , face à la condition biais ;  $F [1, 6] = 39,8 ; p < 0,0007$ , face à la condition côté), alors que les configurations biais et côté ne diffèrent pas significativement entre-elles ( $F [1, 6] = 1,17 ; NS$ ). Il apparaît donc que la condition anthropomorphique fournit une efficacité supérieure dans la précision de préhension des objets en comparaison avec des positions relatives de caméra plus excentrées du bras.



**Figure 28 :** Taux de réussite de saisie de l'objet selon les conditions de téléopération.

Egalement, le taux de réussite est statistiquement variable en fonction des rayons considérés ( $F [4, 36] = 30,26 ; p < 0,00001$ ), avec un pourcentage de saisie supérieur pour les rayons centraux par rapport aux latéraux. De plus, l'effet d'interaction observé entre la variable condition et la variable rayon ( $F [8, 36] = 6,15 ; p < 0,0001$ ) montre que les trois configurations télérobotiques n'ont pas la même sensibilité angulaire (figure 29). Ainsi, la condition anthropomorphe n'est pas significativement sujette à l'augmentation de la performance constatée pour les rayons centraux ( $F [4, 12] = 2,08 ; NS$ ) et présente, au contraire, un taux de saisie assez uniformément élevé sur l'espace expérimental. A l'inverse, la configuration biais ( $F [4, 12] = 4,11 ; p < 0,03$ ) et côté ( $F [4, 12] = 42,23 ; p < 0,00001$ ) sont toutes deux statistiquement sensibles à l'angle de préhension. Une telle différence dans la régularité spatiale de la saisie révèle donc un caractère davantage isotrope de la performance anthropomorphe par rapport aux deux autres.

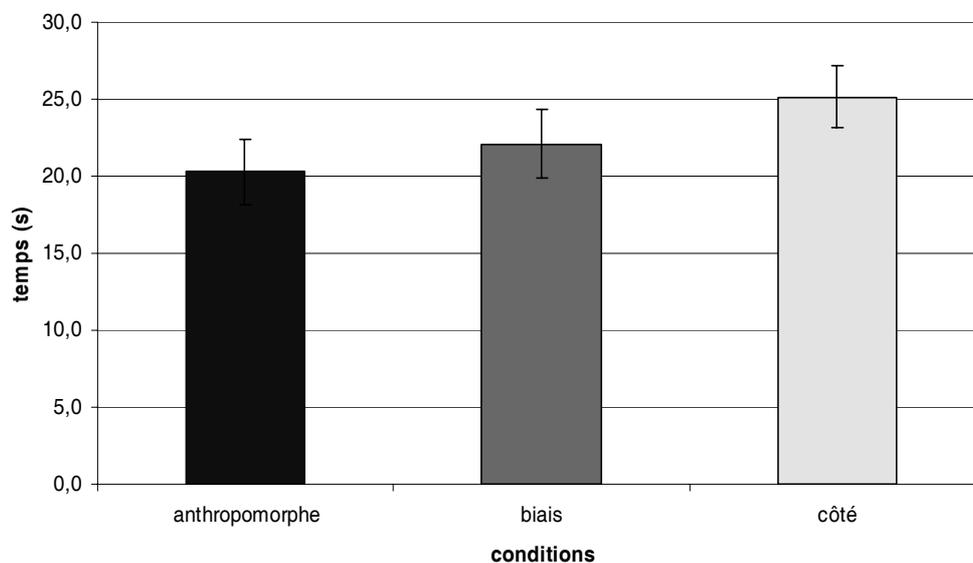


**Figure 29 :** Taux de réussite de saisie de l'objet en fonction des rayons testés pour les trois conditions téléopérées.

### VI.2.2. Temps d'exécution du mouvement

Au niveau du temps moyen d'exécution du mouvement, on observe encore un effet de session ( $F [3, 27] = 32,63 ; p < 0,00001$ ). Ainsi, les sujets sont significativement plus rapides pour accomplir la tâche de saisie avec la pratique. En revanche, on ne constate pas comme

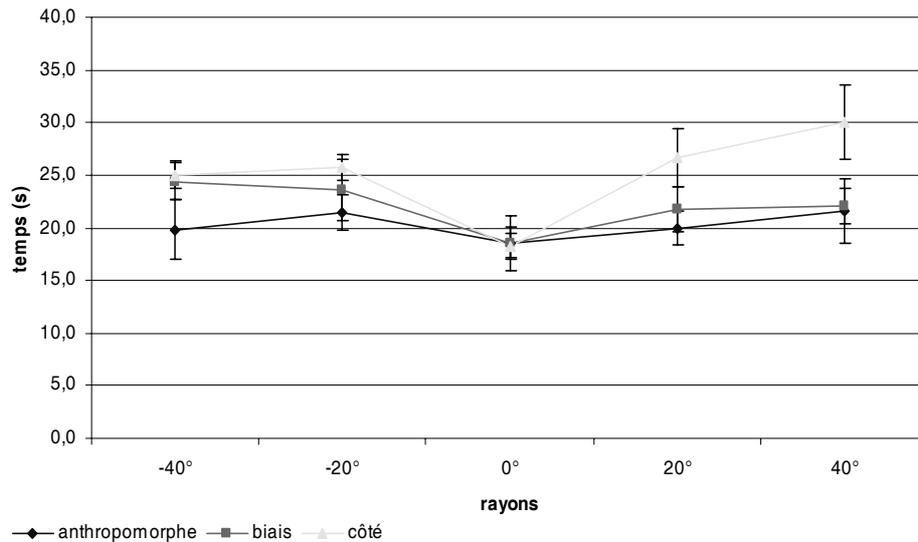
précédemment d'effet statistique entre les trois conditions ( $F [2, 9] = 2,88 ; p < 0,10$ ), même si la configuration anthropomorphe tend à être la plus rapide (figure 30). En fait, la condition anthropomorphe n'est pas significativement plus véloce que la condition biais ( $F [1, 6] = 0,8 ; NS$ ), par contre, elle l'est face à la condition côté ( $F [1, 6] = 6,1 ; p < 0,05$ ). Les configurations biais et côté, quant à elles, ne diffèrent pas entre-elles au niveau de ce paramètre temporel ( $F [1, 6] = 2,39 ; NS$ ). Donc, la tendance générale est une plus grande vitesse d'exécution du geste de saisie en anthropomorphe, mais dont la seule supériorité statistique apparaît vis-à-vis de la condition côté.



**Figure 30 :** Temps moyen d'exécution du mouvement suivant les trois positions relatives de caméra par rapport au bras.

Le temps d'exécution du mouvement est également dépendant du rayon expérimental où s'effectue le geste. En effet, les mouvements réalisés dans l'axe 0 du bras robotique sont significativement plus rapides que ceux accomplis sur les autres angles ( $F [4, 36] = 29,33 ; p < 0,00001$ ). Cependant, l'effet d'interaction entre conditions et rayons ( $F [8, 36] = 8,41 ; p < 0,0001$ ) indique que suivant la condition de téléopération dans laquelle se retrouve l'opérateur, celui-ci ne sera pas influencé de la même manière par les angles d'excentricité du geste (figure 31). Précisément, comme ce fut le cas pour le paramètre du taux de réussite, les sujets de la configuration anthropomorphe sont aussi rapides pour exécuter un mouvement de saisie dans un rayon central qu'excentré par rapport à l'axe de rotation de l'épaule du robot ( $F [4, 12] = 1,58 ; NS$ ). En revanche, les opérateurs des deux autres conditions y sont

beaucoup plus sensibles, puisque les analyses statistiques révèlent un effet d'autant plus significatif que la position de la caméra par rapport au bras est éloignée ( $F [4, 12] = 4,39$  ;  $p < 0,02$ , en configuration biais ;  $F [4, 12] = 51,61$  ;  $p < 0,00001$ , en configuration côté). D'où, l'isotropie spatiale de performance déjà remarquée pour la précision du geste se trouve, ici, confirmée au niveau de sa dimension véloce pour la seule condition anthropomorphe.

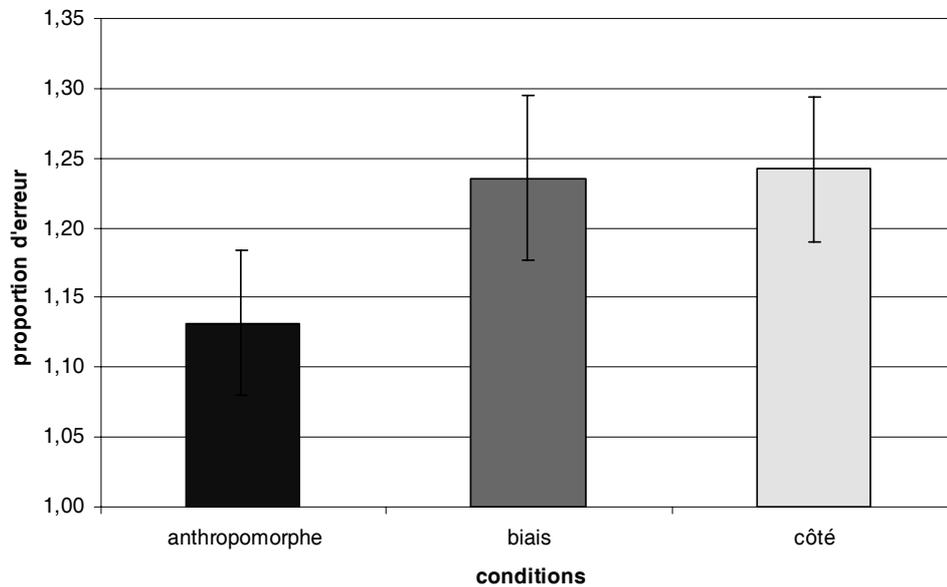


**Figure 31 :** Temps moyen d'exécution du mouvement en fonction des rayons et selon la condition de téléopération.

### VI.2.3. Erreur spatiale

A l'image des paramètres déjà énoncés, l'erreur spatiale est significativement sensible à l'effet de session ( $F [3, 27] = 10,72$  ;  $p < 0,0001$ ). En effet, la proportion d'erreur spatiale de la trajectoire du robot par rapport à la trajectoire référence diminue au fil du temps. En revanche, il n'y a pas de différence statistique au total entre les trois conditions ( $F [2, 9] = 3,47$  ;  $p < 0,08$ ), simplement une tendance de la configuration anthropomorphe à produire une proportion d'erreur moins élevée que les deux autres (figure 32). Plus précisément, si la condition anthropomorphe n'est pas statistiquement plus rectiligne que la condition biais ( $F [1, 6] = 3,14$  ; NS), elle le devient face à la condition côté ( $F [1, 6] = 6,05$  ;  $p < 0,05$ ). Alors que sur ce domaine les configurations biais et côté ne diffèrent encore nullement l'une de l'autre ( $F [1, 6] = 0,49$  ; NS). Donc, une fois de plus, la configuration

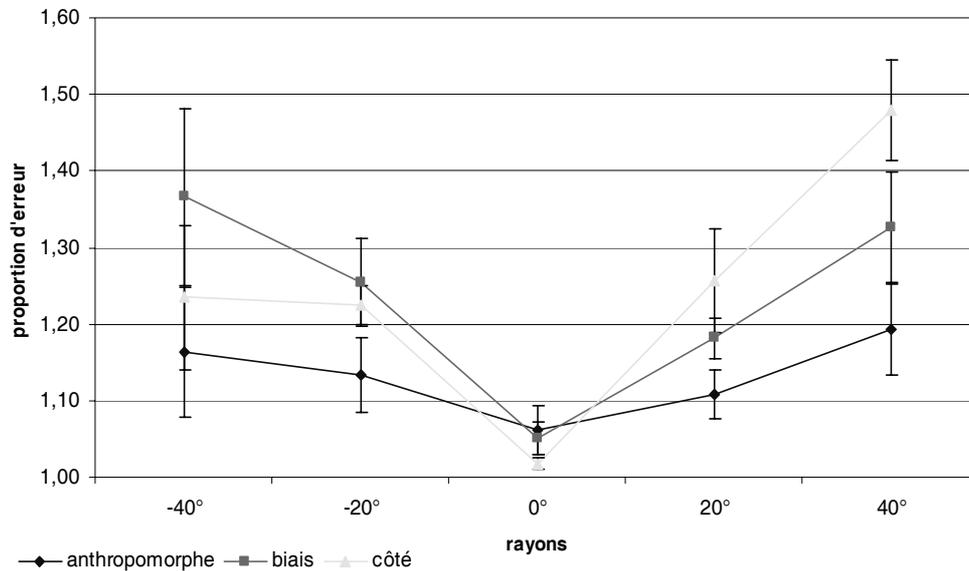
anthropomorphe témoigne de la meilleure performance, qui se traduit, ici, par la cinématique de la trajectoire la plus régulière.



**Figure 32 :** Proportion d'erreur spatiale selon la condition de téléopération.

De nouveau, on constate sur l'ensemble des conditions de téléopération un effet de rayon en ce qui concerne ce paramètre d'erreur de trajectoire ( $F [4, 36] = 32,86$  ;  $p < 0,00001$ ). Celui-ci est bien visible sur la figure 33, qui met en évidence un pattern de courbes grossièrement en « V », lorsqu'on rapporte la proportion d'erreur sur les rayons testés. Cela signifie que plus les mouvements à réaliser se rapprochent de l'axe 0 du bras robotique plus ceux-ci sont rectilignes, et inversement. En réalité, ce phénomène est accompagné par un effet d'interaction entre conditions et rayons ( $F [8, 36] = 7,32$  ;  $p < 0,00001$ ), ce qui signifie que suivant la situation expérimentale dans laquelle se trouve l'opérateur, il ne contrôle pas le robot identiquement pour un même angle donné. En effet, on remarque toujours sur la figure 33 que, selon la condition, le pattern en « V » est plus ou moins ouvert. Ceci se vérifie statistiquement, puisque malgré une tendance à l'effet de rayon, celle-ci n'est pas significative pour la condition anthropomorphe ( $F [4, 12] = 3,21$  ;  $p < 0,1$ ). Au contraire des deux autres conditions, dont l'effet est d'autant plus marqué que l'excentricité relative de la caméra par rapport au bras augmente ( $F [4, 12] = 8,26$  ;  $p < 0,002$ , pour le biais ;  $F [4, 12] = 23,10$  ;  $p < 0,0001$ , pour le côté). De tels résultats montrent que la configuration anthropomorphe se distingue aussi sur le plan des variables dynamiques par

une homogénéité spatiale dans la régularité de la trajectoire du bras, ce qui corrobore ainsi les premières analyses phénoménologiques.



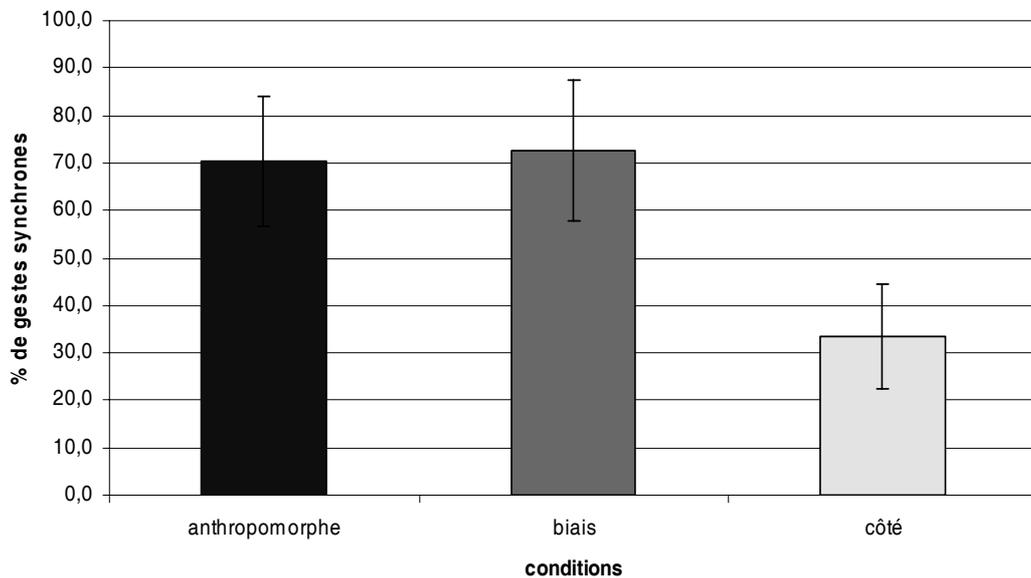
**Figure 33 :** Proportion d'erreur spatiale en fonction des rayons testés, suivant les trois conditions téléopérées.

#### VI.2.4. Coordination motrice

##### *Synchronisation bras/pince*

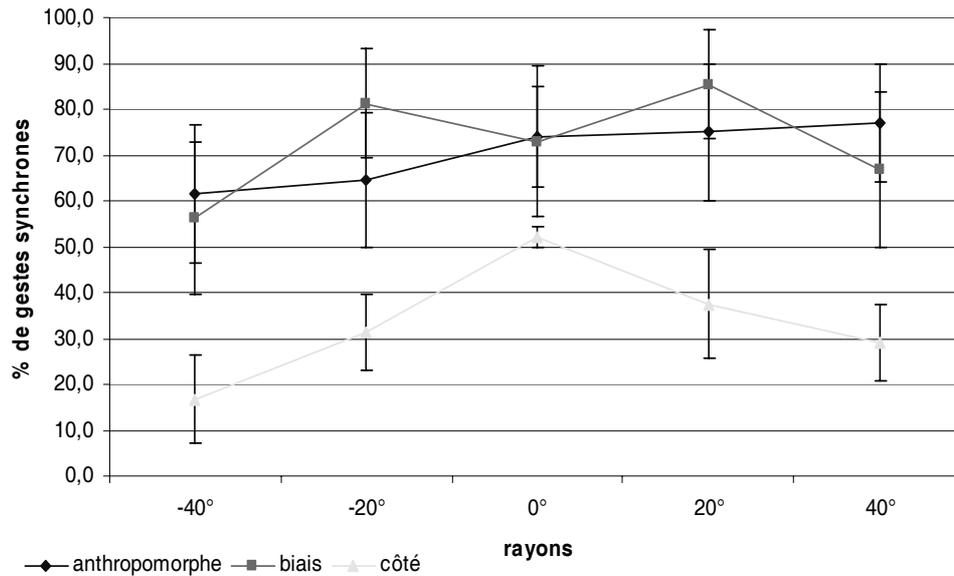
Le pourcentage de contrôle simultané de l'ouverture de la pince avec le déplacement du bras croît de manière significative au cours des sessions ( $F [3, 27] = 5,41 ; p < 0,005$ ). Cet effet témoigne d'une meilleure gestion de la coordination des différents segments du bras de la part de l'opérateur, avec l'acquisition de l'expérience. Le niveau général de maîtrise de la coordination motrice bras/pince ne diffère pas significativement sur l'ensemble des conditions téléopérées ( $F [2, 9] = 3,68 ; p < 0,07$ ), bien qu'on puisse observer que la condition côté tend à être inférieure aux deux autres (figure 34). Cette tendance se voit confirmée statistiquement lorsqu'on compare les conditions deux à deux. En effet, si la configuration anthropomorphe ne diffère pas significativement de la biais ( $F [1, 6] = 0,01 ; NS$ ), elle est statistiquement supérieure à la configuration côté ( $F [1, 6] = 6,94 ; p < 0,04$ ). Une supériorité significative du même ordre est également enregistrée pour la condition biais vis-à-vis de la condition côté ( $F [1, 6] = 6,77 ; p < 0,04$ ). Ainsi, il semble qu'une position de caméra décalée à la perpendiculaire de l'axe antéro-postérieur du robot handicapé, fortement, l'opérateur à

commander simultanément les mouvements du bras et de la pince pour parvenir à un geste de saisie naturellement coordonné.



**Figure 34 :** Pourcentage de mouvements de saisie réalisés par contrôle simultané du bras et de la pince, suivant la condition de téléopération.

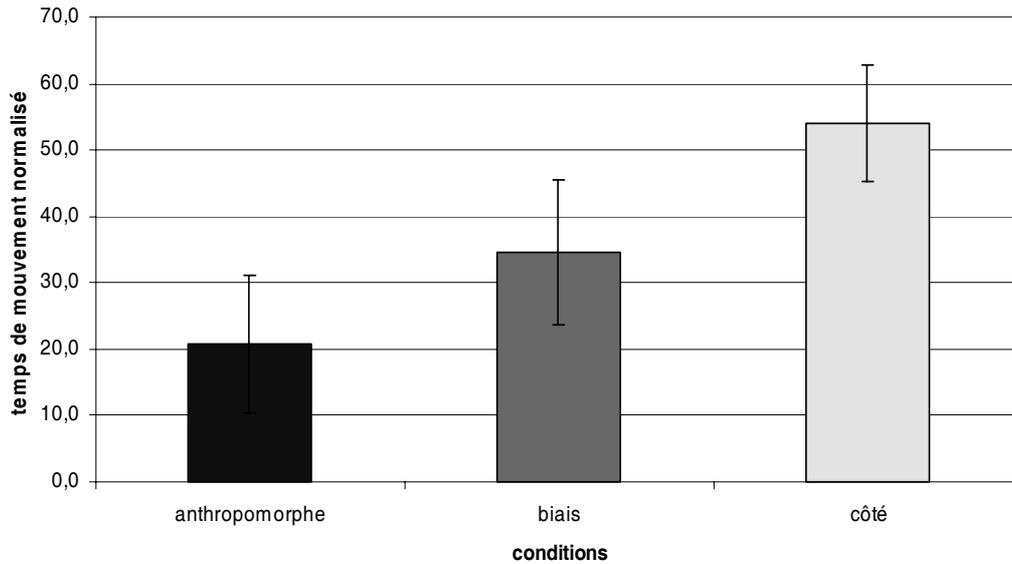
Comme la plupart des autres paramètres, la synchronisation motrice bras/pince est sujet à un effet de rayon ( $F [4, 36] = 6,71 ; p < 0,0004$ ). Cependant, tel qu'on peut l'observer sur la figure 35, le pourcentage de gestes synchrones n'est pas identiquement modulé par les angles expérimentaux pour les diverses conditions de téléopération. Par exemple, la configuration anthropomorphique est une nouvelle fois non soumise à l'effet de rayon, puisque le taux de synchronie exhibé dans cette situation n'est pas significativement différent d'un angle à l'autre ( $F [4, 12] = 1,97 ; NS$ ). A l'inverse, les deux conditions restantes sont relativement sensibles aux rayons car, que ce soit dans une situation de biais ( $F [4, 12] = 4,22 ; p < 0,03$ ) ou dans une situation de côté ( $F [4, 12] = 3,62 ; p < 0,04$ ), la proportion des gestes qu'elles accomplissent de manière coordonnée est significativement modulé par l'angle de saisie considéré. En cela, la synchronisation bras/pince constitue le second processus comportemental dynamique mettant en évidence la singularité de la configuration anthropomorphique quant à la régularité spatiale de la performance qu'elle assure au téléopérateur.



**Figure 35 :** Pourcentage de gestes de saisie effectués par un mouvement coordonné du bras avec la pince, en fonction des rayons et pour chacune des conditions téléopérées.

#### *Initiation de l'ouverture de la pince*

L'instant d'ouverture de la pince, marquant l'initiation de la phase de co-contrôle du mouvement du bras et de la pince, varie au cours des sessions ( $F [3, 27] = 4,32 ; p < 0,02$ ). Ainsi, plus le sujet acquiert une pratique du robot, plus le moment d'ouverture de la pince est précoce vis-à-vis du déroulement temporel du geste de saisie. Bien que l'initiation de cette ouverture ne diffère pas significativement sur l'ensemble des conditions de téléopération ( $F [2, 9] = 3,36 ; p < 0,08$ ), on observe tout de même que plus la position relative de la caméra s'éloigne d'une configuration anthropomorphique, plus le délai d'ouverture de la pince augmente (figure 36). Statistiquement, si la condition anthropomorphe ne diffère pas de la biais ( $F [1, 6] = 0,87 ; NS$ ), elle invite, cependant, les opérateurs à déclencher une ouverture de pince significativement moins tardive que celle enregistrée en condition côté ( $F [1, 6] = 7,98 ; p < 0,03$ ). Une nouvelle fois, en revanche, la comparaison directe entre biais et côté ne s'accompagne pas d'une distinction statistique significative ( $F [1, 6] = 2,66 ; NS$ ). En conclusion, ce dernier paramètre d'évaluation indique que la configuration anthropomorphique *afforde* au téléopérateur un timing de coordination bras/pince qui s'approche du modèle humain, une telle identité ne faisant qu'appuyer les données précédemment analysées.



**Figure 36 :** Phase d'initiation de l'ouverture de la pince par rapport au décours temporel normalisé du mouvement de saisie, suivant les trois conditions de téléopération.

### VI.3. Discussion

L'expérience a consisté à analyser la dynamique de l'action de saisie d'un bras téléopéré lorsqu'on teste différentes positions de caméra. Précisément, on a opéré un éloignement progressif, selon un arc de cercle, de la localisation des caméras par rapport au bras, de manière à ce que les configurations obtenues obéissent à une relation de moins en moins anthropomorphique. Trois configurations ont ainsi pu être testées. La condition *anthropomorphique* pour laquelle la relation anthropométrique unissant la position des yeux à celle de l'épaule est grossièrement respectée. La condition *biais* où la caméra observe un décalage latéral de 45° d'arc vis-à-vis de l'axe antéro-postérieur du robot. Et enfin, dans la situation de *côté* l'excentricité de la caméra est encore plus conséquente, puisqu'elle est à la perpendiculaire de l'axe de rotation 0° du bras. Ces trois configurations matérialisent donc bien respectivement des niveaux décroissants dans le respect de l'anthropométrie humaine.

La première observation est que pour l'ensemble des paramètres analysés les opérateurs améliorent systématiquement leur performance au cours des sessions. Ce résultat indique que les sujets développent une adaptation progressive à la situation de contrôle à distance dans laquelle ils ont été plongés. Cela dit, le niveau d'adaptation atteint suivant la condition expérimentale varie beaucoup d'un groupe à l'autre. Par exemple, à un premier

niveau d'analyse purement phénoménologique, on remarque déjà de grosses différences qui permettent de dresser des tendances générales.

Tout d'abord, pour le pourcentage d'objets saisis avec succès, la configuration anthropomorphique offre une performance bien supérieure aux deux autres. Cette supériorité s'avère aussi vrai sur le plan du taux de réussite pure que sur la régularité spatiale dans le niveau de cette performance. Pour ce qui est du second paramètre d'évaluation, le temps d'exécution du mouvement, si la différence est moins nette que pour le précédent, la tendance générale reste rigoureusement identique. La condition anthropomorphe est, avec la condition biais, la configuration qui assure la préhension la plus rapide, ces deux situations laissant donc loin derrière la disposition offrant la vue de côté. A noter, de plus, que l'architecture de type humain conserve sa singularité dans le domaine de l'homogénéité spatiale de l'accomplissement de la tâche, puisqu'elle ne présente pas, comme les deux autres, d'anisotropie quant à la vitesse de l'exécution de son mouvement en fonction des rayons testés. Ce résultat suggère que l'avantage fourni par cette configuration compense en une certaine mesure l'hétérogénéité de notre interface de commande (Zhai *et al.*, 1997). En définitive, la réalisation du mouvement s'accomplit avec un couple vitesse/précision dont la valeur semble croître régulièrement plus la configuration télérobotique se rapproche d'un modèle métrique de nature humaine.

Les paramètres d'évaluation plus fins corroborent cette supériorité phénoménologique des situations se rapprochant de l'anthropomorphie. En effet, que ce soit pour la cinématique du mouvement ou pour la coordination motrice entre la pince et le bras, la condition anthropomorphique diffère systématiquement de la condition côté. La condition biais aurait quant à elle une position intermédiaire entre ces deux, n'étant rarement significativement différente de l'une comme de l'autre. Là où la configuration anthropomorphique maintient sa supériorité, c'est encore au niveau de son isotropie spatiale dans la régularité de sa performance. Donc, une nouvelle fois, l'analyse de la qualité de l'exécution du mouvement met en évidence que, plus la configuration télérobotique respecte une certaine anthropométrie plus l'opérateur aura un pattern de geste de saisie proche du modèle humain. C'est ainsi que les conditions anthropométriques et, en une moindre mesure, biais sont celles qui exhibent la plus importante linéarité de trajectoire, signe d'une meilleure maîtrise dans le contrôle du mouvement comme cela s'observe lors de la maturation du système nerveux chez l'enfant (Konczak *et al.*, 1997 ; Yan *et al.*, 2000). De même, la synchronisation de commande des segments distaux (la pince) et proximaux du bras est significativement mieux coordonnée et son initiation plus fidèle au comportement humain (Jeannerod, 1988 ; Meyer *et al.*, 1988 ;

Jakobson et Goodale, 1991), lorsque la position relative de la caméra par rapport au robot tend vers une relation anthropométrique.

De l'ensemble de ces résultats, on peut déduire qu'une condition anthropomorphique offre à l'opérateur une performance en terme de vitesse et précision du contrôle du télémanipulateur qu'une vision de côté ne pourra jamais lui donner. Cette supériorité semble clairement due au fait que la configuration anthropomorphe fournit à l'individu des relations métriques connues, lui permettant d'exprimer une dynamique de mouvement de type humain et ainsi de s'approprier au final la machine. A l'inverse, l'analyse de la cinématique et de la coordination du geste en situation de côté fait douter que les opérateurs soient parvenus à une appropriation du système, du moins comparable à la condition anthropomorphique. Quant au niveau intermédiaire de la position biais, il pourrait s'interpréter par le fait que cette situation renvoie à l'opérateur une relation œil/bras encore relativement proche du naturel. Ce type d'interprétation se voit corroborée par les études menées dans des tâches d'atteinte manuel de cible supervisée sur écran vidéo (Pennel *et al.* 2002 ; Pennel *et al.*, 2003). En effet, ces travaux montrent que plus le décalage angulaire entre le référentiel visuel et le référentiel moteur augmente plus l'erreur de pointage est élevée, ce qui suggère que l'individu a la nécessité de se resituer suivant un système égocentrique de référence. Aussi, dans le cadre d'une situation de téléopération, il apparaît évident que c'est en respectant une configuration caméra/robot anthropomorphique qu'on permet à l'opérateur de se placer le plus facilement dans ce système de référence égocentré, lequel l'amenant aisément à s'approprier la machine par un processus à dominante assimilatrice.

## **VII. Conclusions**

Au cours de ce chapitre nous avons pu démontrer dans un premier temps que, malgré la complexité de l'interface de contrôle et la distance séparant le bras télémanipulateur de l'opérateur humain, celui-ci parvient à un niveau d'appropriation assez élevé du système. Il apparaît également dans ces expériences que la situation de relation anthropomorphique unissant la position de la caméra par rapport au bras robotique, amène le sujet à transposer ses caractéristiques corporelles dans la représentation qu'il se crée de la machine. Ce phénomène est un indice supplémentaire nous permettant d'inférer que lorsque l'architecture robotique obéit à une configuration de type humaine, l'opérateur tend à s'approprier le système selon un processus à dominante assimilatrice.

Un tel résultat ferait supposer qu'il est préférable de placer l'opérateur en condition anthropomorphique. Cependant, un certain nombre de références de la littérature (Rabardel, 1993a ; Poyet, 1989, 1993) soulèvent l'effet pervers des projections de l'homme sur la machine quant aux représentations parfois erronées auxquels elles aboutissent, et dans lesquelles l'opérateur risque de s'enliser. Ce genre d'erreur a, en effet, été observé quant à la représentation spatiale que les sujets présentaient vis-à-vis des capacités d'extension du bras manipulateur. Aussi, afin de s'assurer si la configuration anthropomorphique était réellement la solution la plus adaptée dans le cas précis d'un télémanipulateur robotique tel que le bras MANUS, il a fallu passer par une analyse détaillée de la dimension motrice de la relation homme-machine.

Cette analyse de l'action a confirmé les résultats obtenus sur le plan perceptif quant à une appropriation supérieure du robot en situation anthropomorphe. De plus, les données phénoménologiques montrent que ce mécanisme d'appropriation ne semble pas être accompagné par un phénomène de transposition préjudiciable au contrôle moteur du robot, puisque c'est également la condition anthropomorphique qui offre l'efficacité (taux de réussite et temps d'exécution du mouvement) la plus élevée aux opérateurs. L'ensemble de ces résultats nous permet ainsi de déduire que, lorsqu'une machine présente un mode de fonctionnement qui se rapproche du modèle humain (i.e. bras articulé se mouvant suivant un mode de déplacement cartésien), c'est en la configurant selon une architecture structurale anthropomorphe que l'opérateur pourra au mieux se l'approprier.

D'autre part, ces expériences amènent certaines réflexions sur un axe plus fondamental. Comme on vient de le voir, elles suggèrent donc qu'il y a incorporation du télérobot dans l'espace pericorporel de l'individu. Or, dans des situations de téléopération la distance entre le poste de contrôle et le lieu où évolue le robot va jusqu'à couvrir parfois des milliers de kilomètres, comme lors de l'opération chirurgicale réalisée entre Strasbourg et New York (Marescaux *et al.*, 2001). On ne peut donc imaginer un allongement continu de l'espace pericorporel de l'opérateur allant de son espace proche jusqu'à l'espace de travail de la machine. D'où, et c'est là une des conclusions majeures de cette étude, l'espace pericorporel pourrait ainsi être discontinu suivant l'outil utilisé. Aussi, la terminologie d'espace pericorporel ne serait peut-être qu'un abus de langage, car elle ne recouvrirait pas la réalité profonde d'un tel espace.

En effet, l'expression d'espace d'action serait sans doute plus appropriée. Même si celle-ci a déjà été employée par Cutting (1997) pour désigner la zone correspondant au secteur d'intervention sur le monde, que cet auteur élargit d'ailleurs à des dimensions non

atteignables par la simple extension du bras (lui ne l'a cependant pas imaginé possiblement discontinu). Ainsi, à la dénomination « espace corporel », on lui préférerait « espace d'action », car la dimension commune entre nos expériences et la littérature en neuropsychologie ou neurophysiologie semble porter davantage sur le secteur spatial où l'individu peut agir que sur le secteur proche qui l'entoure. En ce sens, nos résultats militent en faveur d'une dichotomie de l'espace non pas basée sur le proximal et le distal, mais plutôt sur un « espace d'action » versus « espace de non action ».

Aussi, afin de pousser plus avant cette réflexion, il est maintenant intéressant d'analyser jusqu'à quel degré la machine pénètre le schéma corporel de l'opérateur, lorsque celle-ci est configurée selon un modèle humain, non plus seulement au niveau morphologique mais à un niveau morpho-fonctionnel.

# **Aspect morpho-fonctionnel : implémentation de mécanismes d'anticipation visuo-motrice**

## RESUME

Cette étude a cherché à évaluer le niveau et la nature de l'adaptation de l'opérateur au système de téléopération, en fonction du caractère « anthropomorphe » versus « non anthropomorphe » du fonctionnement de celui-ci. Pour cela, nous avons suivi une démarche qui a consisté à implémenter des mécanismes d'inspiration biologique sur un robot mobile téléopéré. Dans la tâche de pilotage demandée aux sujets, le comportement choisi fut le mécanisme d'anticipation visuo-motrice observé chez l'homme lors du contrôle de son déplacement. Cette implémentation a été effectuée suivant deux modes de couplage : orientation de caméra asservie à la direction du déplacement (modèle « plate-forme ») ou bien, direction du déplacement asservie à l'orientation de la caméra (modèle « caméra »). Le premier mode de couplage assurant l'anticipation ne respecte pas une architecture motrice de type humain, pour cette raison il est qualifié comme « non anthropomorphique ». Le second, au contraire, copiant plus fidèlement l'organisation spatio-temporelle d'anticipation visuo-motrice de l'homme, est dit de nature « anthropomorphique ». Les résultats montrent (i) qu'un téléopérateur s'adapte plus facilement au pilotage d'un véhicule lorsque celui-ci est pourvu d'un mécanisme biologique d'anticipation et (ii) que cette adaptation s'effectue par un processus à dominante d'assimilation dans le cas du modèle « caméra » versus d'accommodation avec le modèle « plate-forme ». Ceci confirme que la coopération homme-machine bénéficie de l'implantation sur l'engin téléopéré de comportements de type humain et que l'adaptation de l'opérateur au système se verra favorisée par des modes de couplages visuo-moteurs proches de ceux de l'homme.

## **I. Cadre d'étude**

### **I.1. L'information visuelle en tant que facteur critique**

En téléopération, l'absence ou la mauvaise restitution de certains types d'informations perceptives va contraindre l'opérateur à privilégier certaines modalités sensorielles sur d'autres. Ainsi, de nombreuses études ont démontré qu'en condition de téléopération, la modalité visuelle est surexploitée par rapport à une situation naturelle (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 la parallaxe de mouvement ainsi que les mouvements de l'observateur qui ne génèrent pas de flux optique (Cornilleau-Péres & 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, les limitations visuelles engendrées par la situation de téléopération peuvent se décomposer suivant la qualité des paramètres temporels et spatiaux du retour vidéo.

D'un point de vue temporel, la commande d'un engin téléopéré nécessite d'exercer sur lui un contrôle quasi continu, si on ne peut s'appuyer sur des actions automatisées (par exemple, l'évitement d'obstacle). 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 ; 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 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 supérieur à 300 millisecondes<sup>13</sup> (entre l'action de l'opérateur et le retour visuel de cette action) semble être une valeur maximale pour permettre le contrôle visuel du mouvement d'une cible présentée sur un terminal vidéo (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 &

---

<sup>13</sup> En réalité la valeur exacte de tolérance à un délai temporel est fortement dépendante de la tâche à accomplir, même si un temps de 300 millisecondes paraît bien constituer une limite maximale quelque soit l'action considérée.

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 de l'environnement virtuel est supérieure à 120 degrés, les sensations de vection (sensation illusoire 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 apparaît donc qu'une adéquation doit 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 perturber 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 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. C'est pour cette raison que, selon notre démarche bionique, ce sont ces stratégies adaptatives « naturelles » que nous allons tenter de décrire et d'implémenter dans le cadre du téléguidage d'un engin, avec la vision comme modalité sensorielle prioritairement impliquée.

## **I.2. L'anticipation visuo-motrice comme solution comportementale**

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. Cette faculté provient du fait que 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 chez l'homme prouvent que le cerveau n'attend jamais que le sens du toucher soit activé pour produire un début de réponse. Dans cette situation, le cerveau va produire une contraction des muscles environ 300 ms avant que l'objet ne touche la main (Lacquaniti & Maioli, 1987).

Si l'on se base à nouveau sur un point de vue évolutif, on remarque que l'apparition de la vision fovéale chez les prédateurs 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 obstacles en profondeur, l'apparition de la poursuite oculaire visuellement guidée... Mais ces avantages de la vision frontale ont eu pour inconvénient que ces animaux (dont fait partie l'homme) ont alors perdu la vision panoramique (propre aux proies) 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. Ainsi, c'est par ses propriétés d'optimisation de l'exploration de l'espace que le comportement adaptatif d'anticipation visuelle a été sélectionné par l'évolution.

Cette stratégie d'anticipation visuelle va concerner tout aussi bien des mouvements de préhension que de locomotion. En ce qui concerne la préhension, les travaux menés par Land *et al.* (1999) sur les activités quotidiennes laissent apparaître que, lors de la manipulation d'objets, le regard est déplacé vers le prochain objet à saisir, une seconde environ avant que l'utilisation du premier ne soit terminée. Ainsi, chaque étape des actions de tous les jours, 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 à réaliser. 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. 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 (Land, 1998). Il en va de même pour le contournement d'un repère. Les enregistrements des mouvements du regard et du corps montrent que le regard pointe en direction du repère 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). De plus, il est important de souligner que ces deux études de Grasso *et al.* (1996 et 1998) mettent en évidence le même pattern dans la dynamique d'orientation de la tête, que l'individu ait à réaliser une trajectoire courbe (1996) ou un contournement de repère (1998). Ce qui montre que ces deux tâches semblent relativement similaires quant aux mécanismes de contrôle sensori-moteur qu'elles mettent en jeu.

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 déplacement. En effet, dans cette partie de la courbe il y a une annulation dans la direction du flux optique, qui reste à une même position dans le champ visuel pour une courbure de virage constante, rendant ce point particulièrement pertinent pour stabiliser la trajectoire du véhicule (Raviv & Herman, 1993). En ce sens, une tâche de suivi de trajectoire s'apparente à un cas particulier de contournement de repère, puisque dans les deux situations l'individu va chercher à se baser sur ces repères physiques stables de l'environnement pour contrôler son déplacement (Land, 1998). 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. Aussi, comme il a déjà été souligné précédemment, les systèmes télérobotiques 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.

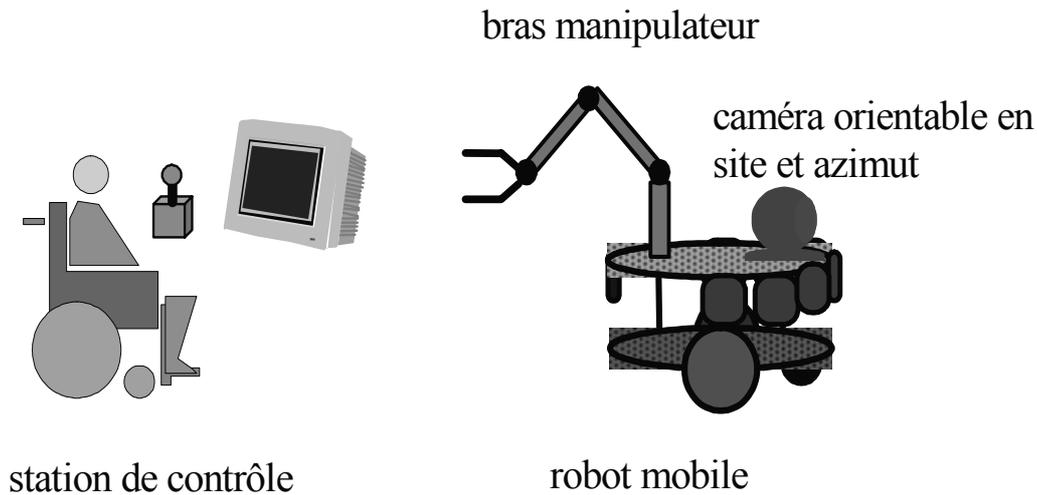
Pour cela, une analogie a été effectuée entre la direction du regard humain et la caméra mobile qui équipe le robot. Au vu de l'architecture fonctionnelle de notre système (sur laquelle on reviendra plus en détail dans la section suivante), il s'offre deux possibilités d'implémenter une anticipation visuelle sur le déplacement : soit (i) par automatisation du mouvement anticipatoire de la caméra en fonction des commandes de navigation que l'opérateur transmet 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'interface 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.

Les hypothèses de notre travail expérimental étaient 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 fournir une performance de conduite encore plus élevée, car en plus proche adéquation avec le programme moteur humain. 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.

## **II. 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 plate-forme mobile portant un bras manipulateur (figure 37). La plate-forme, d'une dimension de 0,4 mètre de large, 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<sup>14</sup>.



**Figure 37 :** Le système ARPH est composé (i) d'un bras manipulateur monté sur une plate-forme robotique mobile équipée d'une caméra orientable en site et azimut et, (ii) d'une station de contrôle permettant à l'opérateur de contrôler à distance ce robot d'assistance.

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 capteurs, 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. Les serveurs sont écrits en langage C, le client en Java. Dans la présente expérimentation, deux modes de Coopération Homme-Machine ont été développés : le modèle d'anticipation sur le déplacement par commande de la plate-forme mobile versus le modèle par commande de la caméra. A noter

<sup>14</sup> Le DXKEY est une passerelle développée par un constructeur privé, qui assure la liaison entre le bus CAN et le port parallèle du PC.

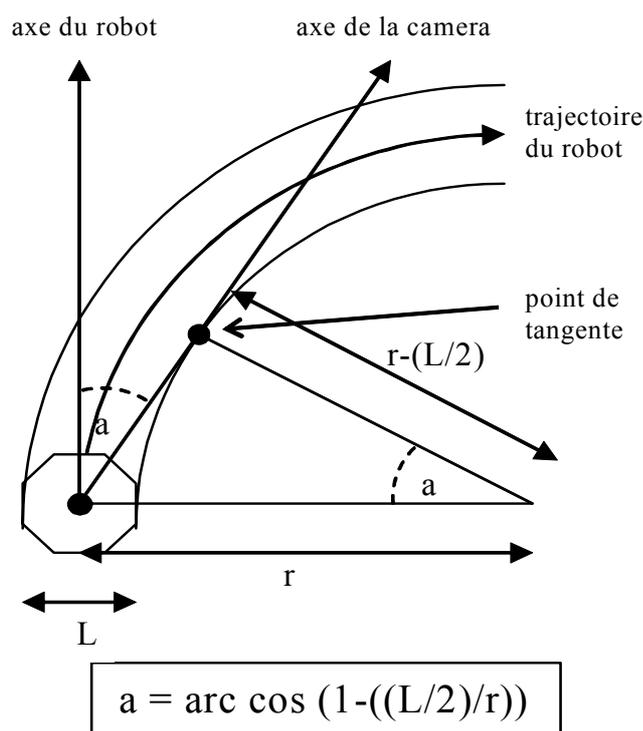
que pour ces deux modèles, la valeur des angles est toujours exprimée en fonction d'un référentiel relatif au robot (et non absolu sur l'environnement).

### III. Implémentation suivant un modèle non anthropomorphique

#### III.1. Description du modèle « plate-forme »

Dans cette situation, l'opérateur ne contrôle qu'indirectement l'orientation de la caméra, en fonction de la commande de navigation directe qu'il transmet 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 38 qui représente une vue de dessus schématique de la plate-forme mobile se déplaçant suivant le « modèle plate-forme ».

Dans notre architecture robotique, les commandes de navigation que l'opérateur envoie au robot sont traduites en terme de vitesse. Il en résulte que l'angle de navigation du véhicule est défini par le ratio entre la vitesse linéaire et la vitesse angulaire qui est communiqué aux moteurs des roues. 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. Cet angle ( $a$ ) correspond donc à l'angle compris entre l'axe de l'avant du véhicule et l'axe de direction de la caméra. Ici,  $\cos(a) = (r - (L / 2)) / r$ , où  $L / 2$  correspond à la demi-largeur du robot (dans le cas de notre plate-forme  $L / 2 = 0,2$  mètre). D'où la modification automatique d'orientation de la caméra suivant l'équation :  $a = \arccos(1 - ((L / 2) / r))$ .



**Figure 38 :** Principe de la modélisation « plate-forme ». L'angle de rotation de la caméra est calculé à partir du rayon de courbure ( $r$ ) de la trajectoire du robot, par utilisation des règles trigonométriques. Ici,  $\cos(a) = (r - (L/2)) / r$ , où  $L/2$  correspond à la demi-largeur du robot. Le rayon ( $r$ ) est obtenu par le rapport de la vitesse de translation sur la vitesse de rotation du robot.

## III.2. Protocole expérimental

### III.2.1. Sujets

Une population de quatorze étudiants ou membres du laboratoire âgés entre 25 et 35 ans a participé à l'ensemble des quatre sessions expérimentales. Deux 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.

### III.2.2. Conditions

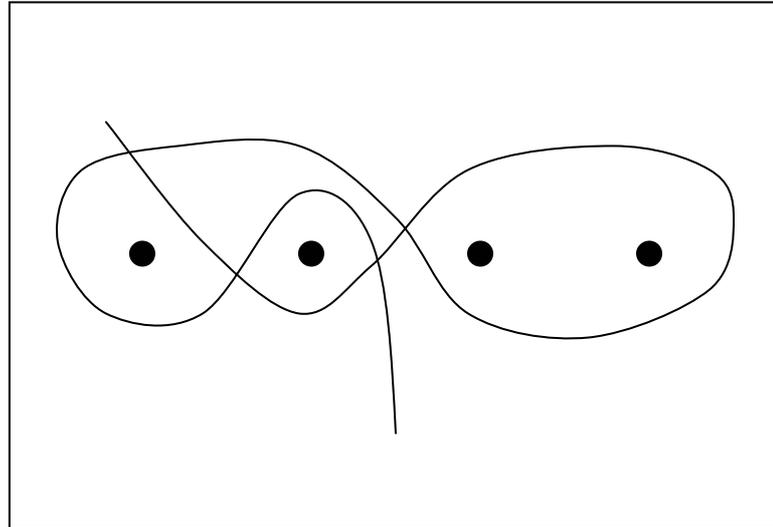
Il y avait deux conditions expérimentales différentes de vision. Une première condition dite de « vision fixe », pour laquelle la caméra restait immobilisée droit devant dans le sens de marche du robot. Et une seconde condition dite de « vision mobile d'anticipation », où la caméra était mobilisée par asservissement à la direction de la trajectoire du robot selon le « modèle plate-forme ».

### III.2.3. Procédure

Sur l'ensemble de l'expérience, tous les sujets étaient placés en situation de téléopération, c'est à dire 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. Les conditions d'entraînements imposées aux sujets étaient identiques pour chaque groupe, et consistaient à faire slalomer le robot entre des balises. 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 repères. L'ensemble des sujets est rapidement parvenu à remplir ces critères d'apprentissage. Cette phase d'entraînement a duré en moyenne trente minutes par sujet.

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 (figure 39). Celles-ci étaient organisées de telle manière que le robot devait effectuer plusieurs types de virages compris entre 20 et 180 degrés. Les dimensions générales du parcours s'étendaient sur une superficie de 4,5 mètres de long sur 3,9 mètres de large. L'espace entre chaque balise était quant à lui de 0,9 mètre. Le 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 conservant un bon niveau de précision, c'est à dire 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 repères, d'un

indice permettant d'estimer la régularité des trajectoires ainsi que d'une loi mettant en relation la géométrie et la cinématique du déplacement. L'analyse statistique utilisée pour le traitement des résultats est une ANOVA.



**Figure 39 :** Représentation schématique du trajet que l'opérateur doit faire exécuter au robot mobile.

### **III.3. Résultats**

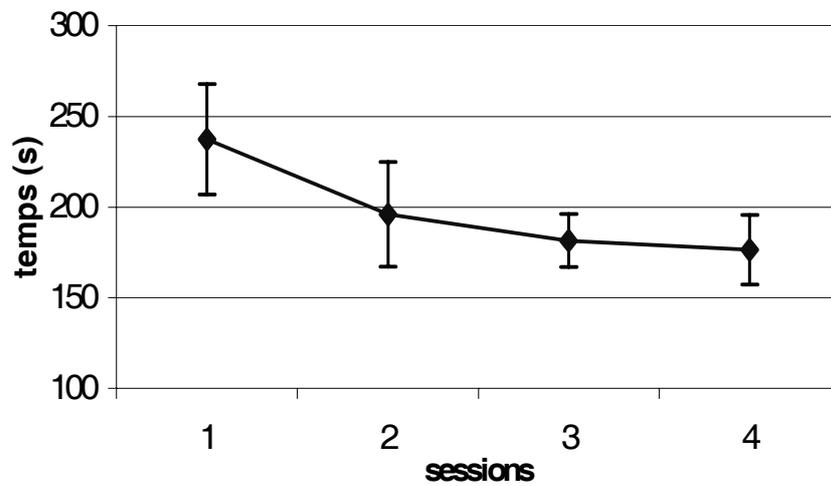
#### III.3.1. Temps d'exécution du parcours

Tout d'abord, on observe une diminution significative du temps nécessaire pour effectuer le parcours au fur et à mesure des sessions ( $F [3, 36] = 3,64 ; p < 0,02$ ). Cet effet de session montre que les opérateurs sont significativement plus rapides avec l'entraînement, en particulier au niveau des premières sessions de test (figure 40).

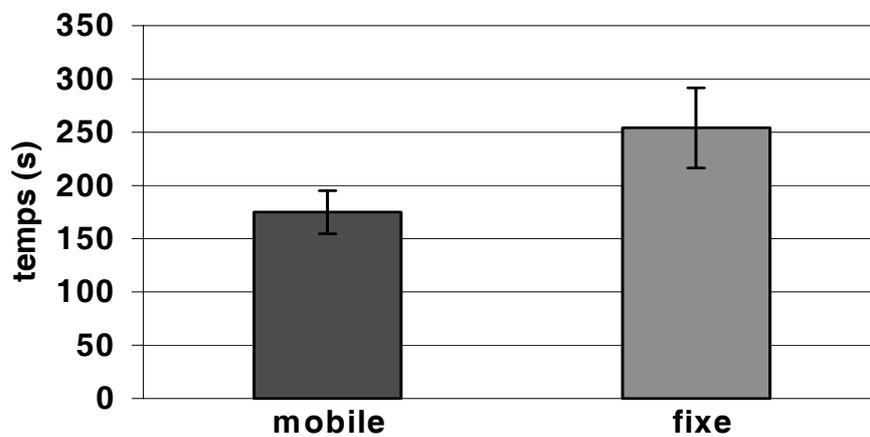
Mais surtout, les sujets s'avèrent beaucoup plus véloces en condition de vision mobile qu'en condition de vision fixe (figure 41). En effet, le temps d'exécution du parcours est significativement plus court lorsque l'opérateur peut bénéficier d'un angle de caméra qui anticipe spatialement sur le déplacement que lorsque celle-ci reste dans une position fixe ( $F [1, 12] = 8,73 ; p < 0,01$ ). Précisément, le temps d'exécution du parcours est de 175 secondes pour le modèle « plate-forme » et de 254 secondes en condition de vision « fixe ».

A remarquer que cette différence significative se maintient au cours des sessions ( $F [1, 12] = 7,02 ; p < 0,02$ , à la 4<sup>ème</sup> session), ce qui tendrait à prouver que le gain

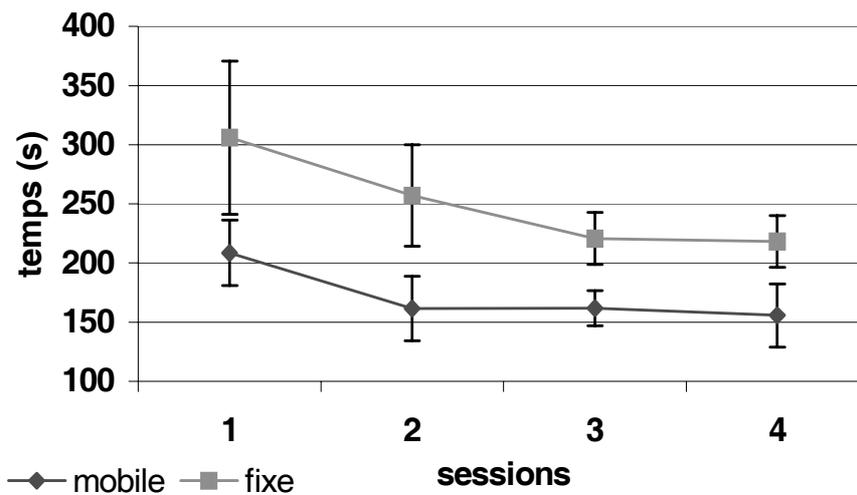
d'expérience à lui seul ne parviendrait pas à combler l'infériorité de la vision fixe par rapport à la mobile (figure 42).



**Figure 40 :** Temps moyen d'exécution du parcours au cours des quatre sessions pour l'ensemble des deux conditions expérimentales confondues. L'effet de session obtenu ( $p < 0,02$ ) dénote une réelle amélioration de la performance de vitesse des téléopérateurs avec l'expérience.



**Figure 41 :** Temps d'exécution du parcours suivant la condition visuelle de pilotage du robot sur l'ensemble de l'expérience. Ce temps est significativement plus court ( $p < 0,01$ ) lorsque la caméra anticipe spatialement sur le déplacement (mobile) que lorsqu'elle reste immobilisée dans l'axe de l'avant du véhicule (fixe).

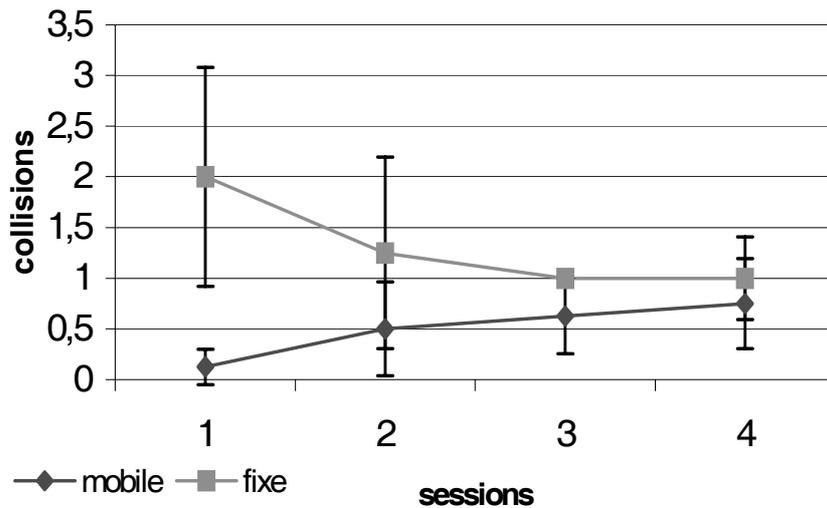


**Figure 42:** Temps de parcours pour les deux conditions de mobilité de vision suivant les quatre sessions expérimentales. On peut noter que la condition de caméra mobile reste toujours plus rapide que la condition de caméra fixe quelle que soit la session, cette différence étant encore statistiquement significative à la dernière session ( $p < 0,02$ ).

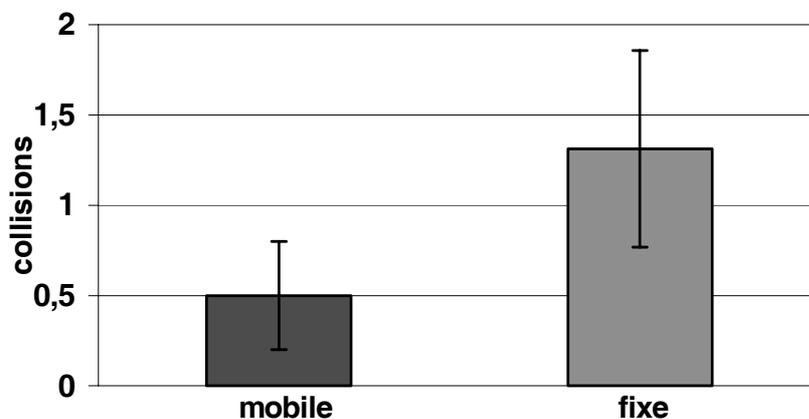
### III.3.2. Nombre de collisions

Ce paramètre, présentant certains résultats différents par rapport à l'analyse précédente, vient apporter quelques nuances sur l'efficacité d'une implémentation suivant un mode de couplage non anthropomorphique. Premièrement, on ne constate pas d'effet de session ( $F [3, 36] = 1,13$  ; NS). Ceci s'explique par le fait que les deux conditions de vision décrivent des patterns de performance inverses au cours des sessions (figure 43), aboutissant à un effet d'interaction significatif entre ces deux conditions et les sessions ( $F [3, 36] = 3,15$  ;  $p < 0,05$ ). Ainsi, le nombre de collisions se réduit avec les sessions, surtout entre la première et la deuxième, pour la condition caméra fixe. C'est le signe 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.



**Figure 43 :** Nombre moyen de collisions pour les deux conditions visuelles suivant les quatre sessions expérimentales. L'absence d'effet de session au niveau de ce paramètre peut s'expliquer par un pattern de performance des conditions inverse avec le temps. Ce qui aboutit à un effet d'interaction significatif entre ces deux types de vision et les sessions ( $p < 0,05$ ).



**Figure 44 :** Nombre moyen de collisions suivant la condition de mobilité de la caméra sur l'ensemble de l'expérience. Ce paramètre mesurant le niveau de précision dans l'efficacité du pilotage, montre que celui-ci n'est pas significativement plus élevé lorsque l'opérateur bénéficie d'une vision mobile implémentée suivant le modèle « plate-forme », que lorsqu'il est placé dans une situation où la caméra reste « fixe ».

Deuxièmement, la grande différence par rapport au paramètre précédent est qu'il n'y a pas significativement moins de collisions contre les obstacles dans la condition caméra mobile que dans la condition caméra fixe ( $F [1, 12] = 4,32$  ; NS), même si la figure 44 montre une nette tendance de la vision fixe (1,3 contact, en moyenne) à produire davantage de collisions que la vision mobile (0,5 contact, en moyenne).

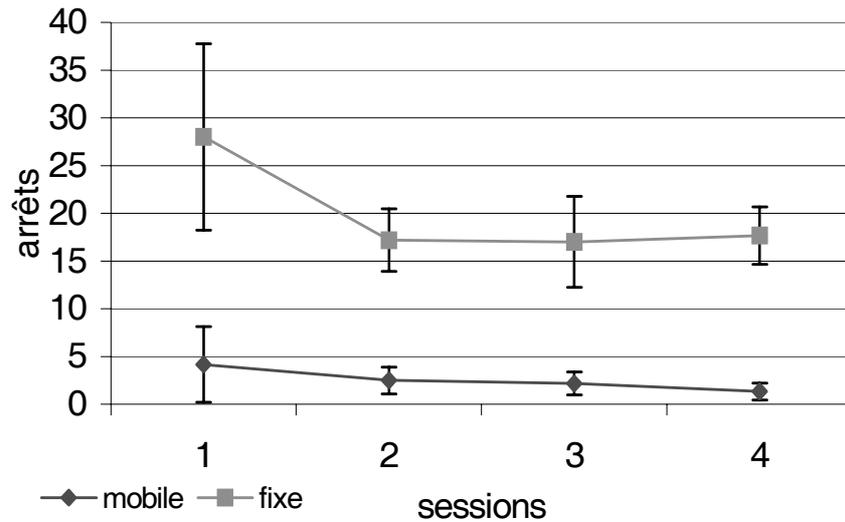
En fait, on observe bien une différence significative entre les deux conditions à la première session expérimentale ( $F [1, 12] = 5,82$  ;  $p < 0,03$ ), mais cette différence s'annule dès la deuxième session ( $F [1, 12] = 1,65$  ; NS). Cela signifie que les indices appris dans l'environnement par les sujets en condition fixe leurs suffisent à réaliser une performance d'évitement d'obstacles aussi bonne, que lorsque les opérateurs bénéficient d'un balayage de caméra suivant un « modèle plate-forme ».

### III.3.3. Nombre d'arrêts

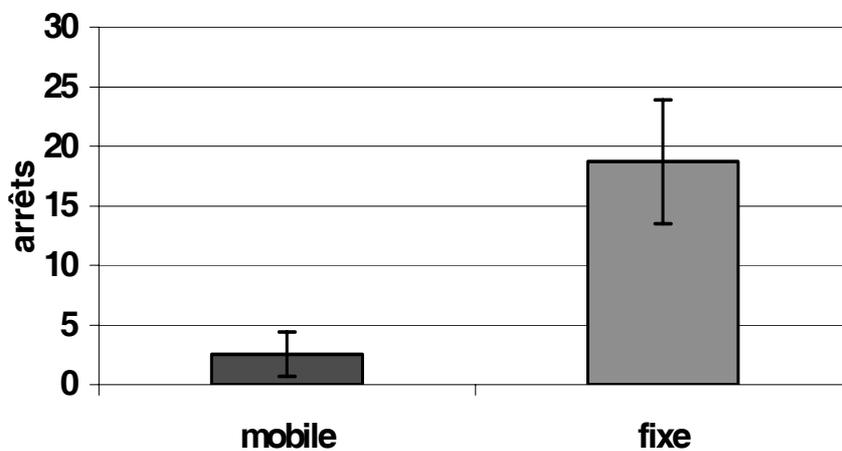
Tout comme pour le paramètre précédent, malgré la présence d'une tendance générale de diminution de la quantité d'arrêts au cours des sessions, en particulier entre la première et la deuxième session (figure 45), celle-ci n'apparaît pas comme étant significative ( $F [3, 36] = 2,09$  ; NS). Des arguments en terme de surapprentissage 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.

En ce qui concerne la comparaison principale, qui oppose la vision mobile à la vision fixe, on retrouve une différence largement significative ( $F [1, 12] = 17,90$  ;  $p < 0,001$ ) en faveur de la condition de vision mobile (figure 46). 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'arrêts du véhicule (le nombre moyen d'arrêts est de : 18,7 pour la condition « fixe », et de 2,5 pour la condition « plate-forme »).

Mais surtout il est important de noter, une fois de plus, que cette supériorité de la vision mobile au niveau de la continuité temporelle du déplacement résiste de manière significative jusqu'à la dernière session ( $F [1, 12] = 23,06$  ;  $p < 0,0004$ ).



**Figure 45 :** Nombre moyen d'arrêts pour les deux conditions de vision au cours des quatre sessions expérimentales. Malgré la nette tendance de diminution des arrêts entre la première et la deuxième session de la condition de vision fixe, on ne note pas d'effet de session sur ce paramètre. A noter, également, le maintien à la dernière session d'une différence significative entre les deux conditions ( $p < 0,0004$ ).



**Figure 46 :** Nombre moyen d'arrêts en fonction de la condition visuelle de pilotage du robot sur l'ensemble de l'expérience. Il y a significativement beaucoup moins d'arrêts lorsque la caméra offre une anticipation visuelle suivant le modèle « plate-forme » que lorsque cette caméra reste figée dans l'axe du déplacement du véhicule ( $p < 0,001$ ).

### III.3.4. 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'arrêts réduit, semblent effectuer des trajectoires plus lissées (figure 47) que ceux du groupe de la vision fixe (figure 48).

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 :

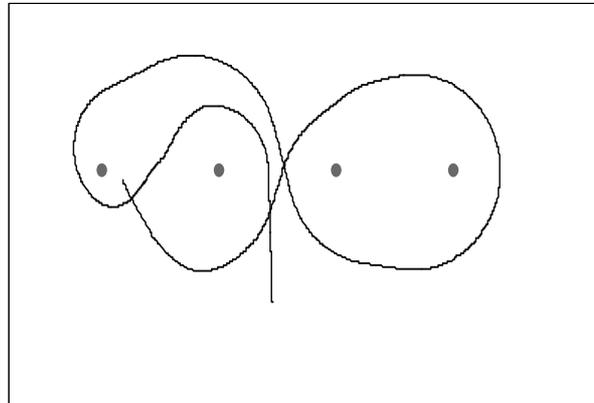
$$r(m) = \frac{v(m/sec)}{w(radians/sec)}$$

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 ( $\geq 1$ ) et son logarithme supérieur ou égal à 0.

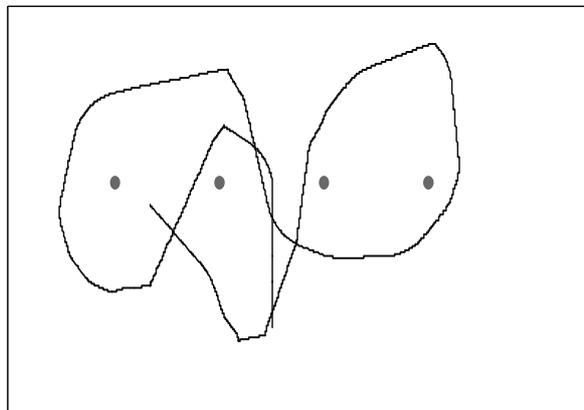
Une trajectoire dans laquelle le sujet s'arrête pour prendre les virages donne lieu à une distribution bimodale des rayons de courbure, avec un pic de distribution centré sur des valeurs négatives du logarithme du rayon et un autre pic centré sur des valeurs positives ou nulles de ce logarithme. Au contraire,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

Pour chaque trajectoire, la distribution du logarithme des rayons de courbure a été calculée et répartie en quinze catégories. Ces catégories correspondent à des valeurs comprises entre -4 et -3,5, -3,5 et -3, -3 et -2,5, ..., 2,5 et 3, c'est-à-dire suivant une échelle d'intervalles constante permettant d'analyser les résultats à partir d'un test d'ANOVA. Enfin, les distributions ont été normalisées, en exprimant les occurrences de rayons de courbure dans

chaque catégorie comme un pourcentage du nombre total d'occurrences pour chaque trajectoire.



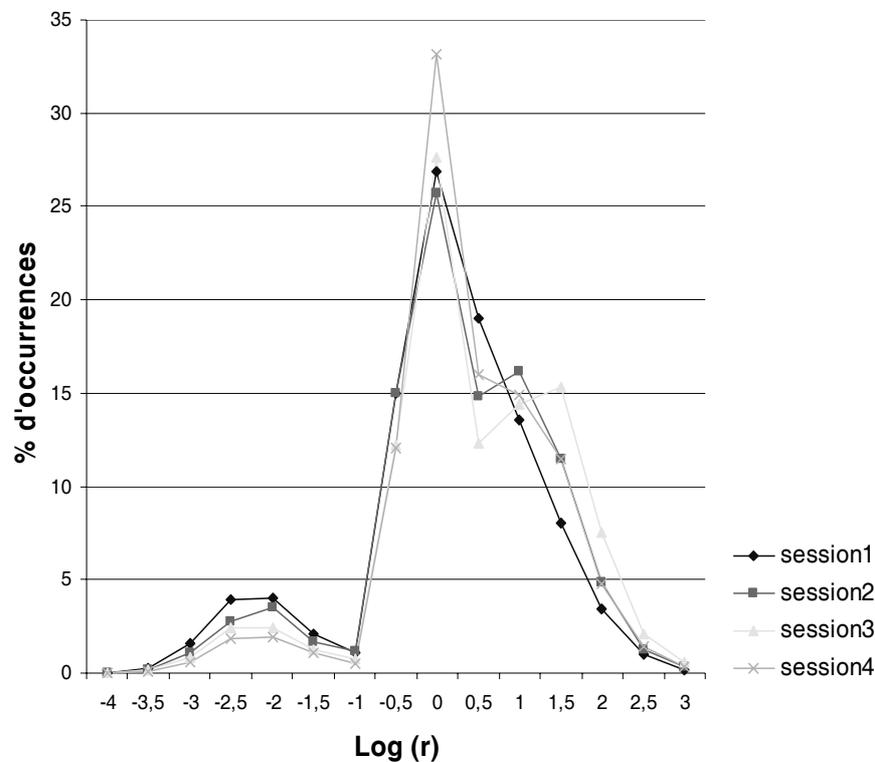
**Figure 47 :** Représentation d'une trajectoire lissée (ou curvilinéaire) réalisée par le robot téléopéré dans une tâche de slalom entre quatre balises. Ce pattern de lissage uniforme est l'exemple type d'une situation où l'opérateur est placé dans une condition où la caméra anticipe visuellement sur le déplacement.



**Figure 48 :** Représentation d'une trajectoire non lissée (ou segmentée) réalisée par le robot téléopéré dans une tâche de slalom entre quatre balises. Ce pattern de rupture du lissage, correspondant à des arrêts avant chaque courbe, est typique d'une situation où l'opérateur est placé en condition où la caméra est immobilisée dans la direction de l'axe avant du véhicule.

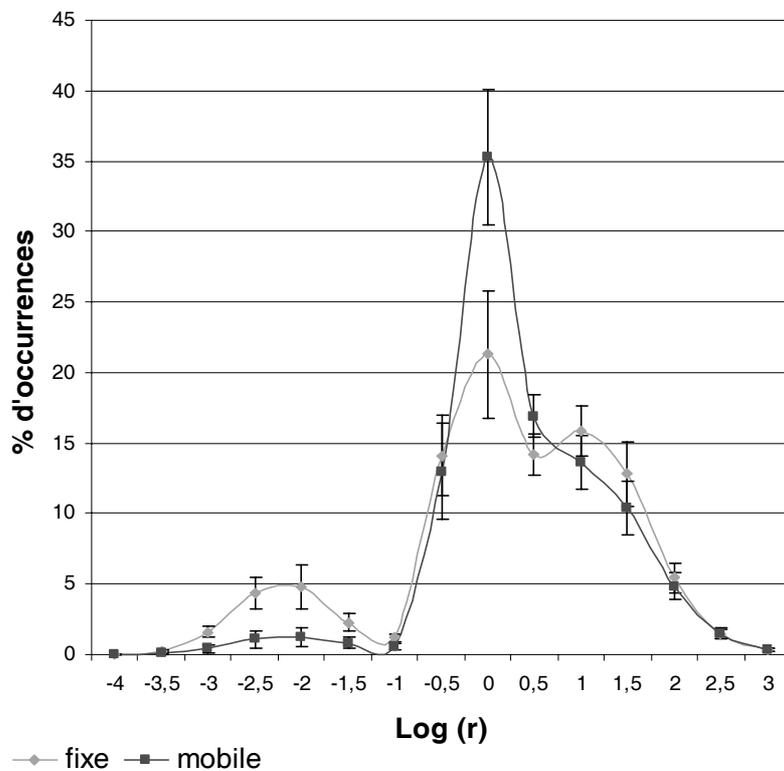
Les premiers résultats montrent un effet significatif du facteur catégorie ( $F [14, 168] = 73,78 ; p < 0,00001$ ), indiquant que la distribution des rayons de courbure n'est pas monotone. On observe, en effet, deux pics principaux (figure 49). Un grand pic centré sur des valeurs du logarithme du rayon de courbure égales à 0, correspondant à des valeurs de rayons de

courbure aux alentours de 1 mètre. 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 -2,5 et -2, sur les figures). Il correspond à des situations dans lesquelles le sujet exécute une rotation avec une vitesse linéaire très faible, afin de faire prendre les virages au robot. On note également une légère montée pour des valeurs de logarithme très élevées (catégories 1 et 1,5), pour lesquelles il ne s'agit plus de courbes mais de lignes droites, à l'échelle du véhicule. C'est pour cette raison que ces dernières données n'ont pas été soumises à plus d'analyses.



**Figure 49 :** Distribution moyenne des (logarithmes des) rayons de courbure, exprimée en pourcentage du nombre total d'occurrences, en fonction des sessions expérimentales, pour l'ensemble des deux conditions visuelles. Le plus grand pic (centré sur une valeur de 0) correspond aux grandes courbes de trajectoire du robot, alors que le plus petit pic (centré sur des valeurs de -2,5 et -2) correspond à des virages effectués avec une très petite vitesse linéaire.

Deuxièmement, on ne constate pas d'effet de session ( $F [3, 36] = 0,35 ; NS$ ) à proprement dit, mais un effet d'interaction largement significatif entre le facteur catégorie et le facteur session ( $F [42, 504] = 2,63 ; p < 0,00001$ ). Ainsi, au cours des sessions, les catégories -2,5 et -2 passent de 4% à 2% d'occurrences, pendant que la catégorie 0 passe de 26% à 33% d'occurrences. Ce premier effet massif signifie qu'avec l'expérience (de la session 1 à la session 4, voir figure 49), le sujet tourne de moins en moins sur place (le pic de distribution des catégories -2,5 et -2 s'effondre) alors que la curvilinearité de la trajectoire s'accroît (le pic de distribution de la catégorie 0 s'élève). On peut donc en déduire que l'entraînement conduit à un lissage des trajectoires.



**Figure 50 :** Distribution moyenne des logarithmes des rayons de courbure, exprimée en pourcentage du nombre total d'occurrences, en fonction des deux conditions expérimentales de vision. Le pourcentage d'occurrences des petits rayons de courbure est significativement plus bas ( $p < 0,01$ ) et celui des grands rayons de courbure significativement plus haut ( $p < 0,02$ ) dans le mode de contrôle suivant le modèle « plate-forme », en comparaison avec le mode de contrôle en vision « fixe » du robot.

Troisièmement, on observe également un effet d'interaction significatif entre la condition de vision et le facteur catégorie ( $F [14, 168] = 4,68 ; p < 0,00001$ ). En effet, la figure 50 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 vision mobile qu'en vision fixe ( $F [1, 12] = 7,90 ; p < 0,02$ ). Inversement, le petit pic, correspondant aux rotations sur place, est significativement plus bas en vision mobile qu'en vision fixe ( $F [1, 12] = 8,88 ; p < 0,01$ ). 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 ( $F [1, 12] = 9,14 ; p < 0,01$ ) que pour les rotations sur place ( $F [1, 12] = 13,62 ; p < 0,003$ ). Cela signifie que l'anticipation visuelle apportée par une vision mobile assure une plus grande fluidité dans l'enchaînement des virages, qu'un entraînement en vision fixe ne peut arriver à égaler.

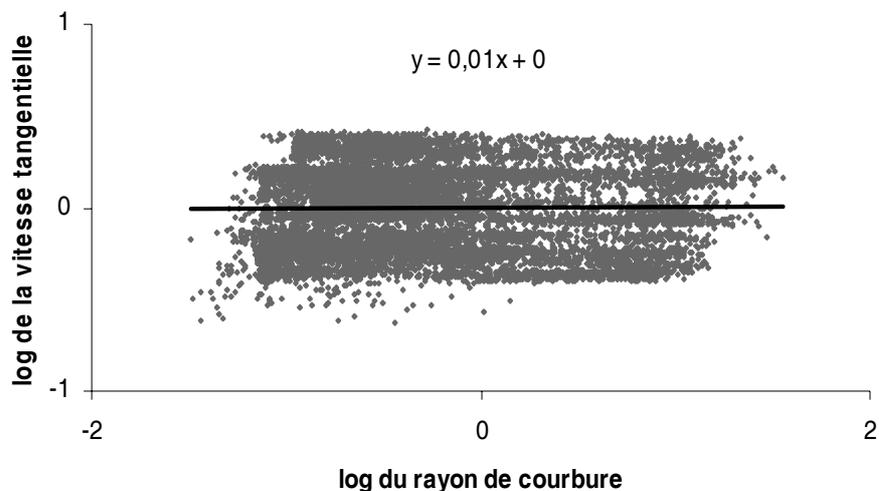
### III.3.5. Relation vitesse/courbure

L'analyse du paramètre précédent nous a montré que lorsque l'opérateur se trouve dans une situation plus proche des conditions naturelles de vision, celui-ci tend à maximiser le lissage des trajectoires du robot. Cette propension à lisser ses déplacements est une particularité que l'humain généralise à la majorité des membres qu'il mobilise, ceci afin certainement d'optimiser une fonction de coût (Todorov & Jordan, 1998 ; Viviani & Flash ; 1995). Aussi, cette optimisation ne semble pas se limiter simplement aux particularités géométriques de la trajectoire mais également au rapport existant entre cette géométrie (rayons de courbure) et la cinématique (vitesse linéaire) du mouvement.

Cette relation a déjà été étudiée pour les gestes d'écriture et de dessin dans un espace 2D (Viviani & Cenzato, 1985) ou 3D (Massey *et al.*, 1992 ; Soechting *et al.*, 1986). Ces mouvements ont été découverts comme obéissant à ce qu'on appelle la « loi de puissance deux tiers » (Lacquaniti *et al.*, 1983 ; Viviani & Schneider ; 1991). Cette loi démontre que la vitesse angulaire de l'extrémité de l'effecteur (ici la main) est proportionnelle à la racine deux tiers de sa courbure ou, de manière équivalente, que la vitesse tangentielle instantanée est proportionnelle à la racine cubique du rayon de courbure. Cela signifie que durant le geste d'écriture, la vitesse de la main diminue dans les parties les plus courbes de la trajectoire et augmente quand la trajectoire devient plus droite. Les origines neuronales de cette loi demeurent encore inconnues. Cependant, le plus remarquable est de constater que cette loi ne semble pas seulement gouverner la génération des mouvements de bras mais, aussi, celle de la

locomotion humaine (Vieilledent *et al.*, 2001). Il est donc tout naturel de se poser la question si cette même relation de proportionnalité entre vitesse et courbure est conservée lorsque l'individu commande le déplacement du robot.

Concrètement, afin de caractériser le comportement locomoteur de l'opérateur via le robot, nous avons calculé les rayons de courbure et les vitesses tangentielles des diverses trajectoires. Après une transformation logarithmique, le coefficient de corrélation ainsi que la pente de la ligne de régression entre ces deux valeurs ont été analysés statistiquement. Puis, les rayons de courbure et vitesses tangentielles ont été normalisés (réduits à un même nombre de points) pour chaque essai et représentés ensembles suivant la condition de vision (figures 51 et 52). Pour que la condition de téléopération suive la « loi de puissance deux tiers », l'analyse de la corrélation entre rayons de courbure et vitesses tangentielles doit révéler une relation linéaire de rapport 1/3 lorsque les deux variables sont représentées suivant une échelle logarithmique. En cas contraire, le comportement ne peut être considéré comme obéissant encore à cette loi biologique.

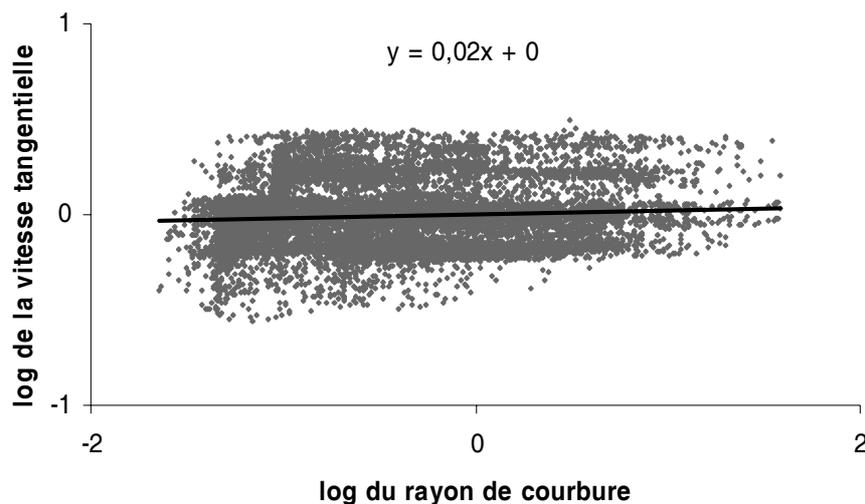


**Figure 51 :** Représentation logarithmique et normalisée de la relation entre rayons de courbure et vitesses tangentielles pour l'ensemble des essais de la condition caméra fixe.

Si l'on commence par la condition de vision fixe, l'analyse de la corrélation entre rayons de courbure et vitesses linéaires montre que celle-ci n'est pas significative ( $R = 0,13$  ; N.S). De plus, lorsqu'on dresse la droite de régression la plus représentative de la relation logarithmique rayons/vitesses, on constate que sa pente est loin d'égaliser le fameux rapport d'1/3 ( $t = 29,86$  ;  $p < 0,0001$  pour  $ddl = 6$ ) s'approchant plutôt d'une valeur nulle (figure 51).

Enfin, il s'avère que cette absence de significativité du coefficient de corrélation demeure inchangée tout au long des sessions expérimentales ( $F [3, 18] = 1,99$  ; N.S). Il en va de même pour le coefficient directeur de la droite de régression qui ne témoigne pas non plus d'un effet de session ( $F [3, 18] = 0,41$  ; N.S).

En ce qui concerne la condition de vision mobile implémentée selon le modèle plate-forme, on ne note encore pas de corrélation significative entre le rayon et la vitesse ( $R = 0,16$  ; N.S). Quant à la droite de régression, on peut observer sur la figure 52 qu'elle possède, comme en condition fixe, une pente qui avoisine une valeur de 0. Elle diffère donc statistiquement largement du coefficient de la « loi de puissance » ( $t = 7,02$  ;  $p < 0,0004$  pour  $ddl = 6$ ). Au niveau des effets de session, ils sont à nouveaux absents, tant pour le coefficient de corrélation vitesse/courbure ( $F [3, 18] = 0,72$  ; N.S) que pour le coefficient directeur de la droite de régression ( $F [3, 18] = 0,71$  ; N.S).



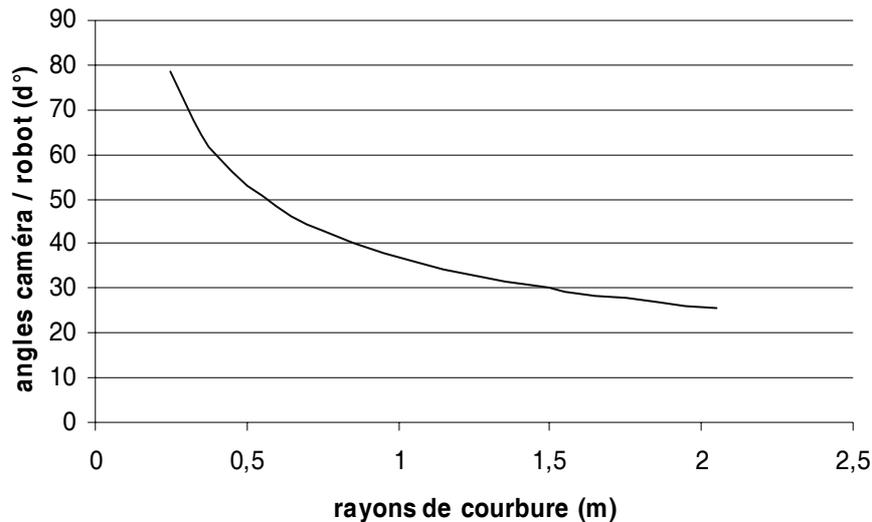
**Figure 52 :** Représentation logarithmique et normalisée de la relation entre rayons de courbure et vitesses tangentielles pour l'ensemble des essais de la condition vision mobile plate-forme.

Pour terminer, la comparaison directe entre la relation vitesse/courbure obtenue en caméra fixe et celle obtenue en vision mobile plate-forme ne révèle pas, à l'image de leur analyse indépendante, de différence significative. En effet, ni la valeur des coefficients de corrélation ( $F [1, 12] = 0,23$  ; N.S) ni celle des pentes de régression ( $F [1, 12] = 0,48$  ; N.S) ne diffèrent statistiquement entre ces deux mécanismes visuo-moteurs de guidage du déplacement.

### III.4. Discussion

Cette expérience a visé à étudier les conséquences de l'implémentation d'un mécanisme d'anticipation visuo-motrice sur l'efficacité et la nature du pilotage d'un robot mobile. Pour cela, une condition de vision mobile (le modèle « plate-forme ») a été comparée à une condition de vision fixe au cours de quatre sessions expérimentales successives. Le modèle « plate-forme » était une situation où la caméra anticipait spatialement sur le déplacement du robot, lequel était piloté par commande directe de la plate-forme mobile, à partir d'un algorithme de contrôle. La vision fixe, quant à elle, était une condition pour laquelle la caméra restait immobilisée droit dans l'axe de déplacement du robot, ce dernier étant piloté également par commande directe de la plate-forme. Pour l'ensemble des conditions, bien qu'une tendance générale a été observée quant à l'amélioration de la performance au fil des sessions (principalement entre les deux premières sessions), celle-ci ne s'est avérée statistiquement significative qu'au niveau du seul paramètre de temps d'exécution du parcours. Ce premier résultat témoigne d'une intégration relativement rapide, de la part des sujets, des propriétés dynamiques du véhicule téléopéré.

Une observation globale des résultats expérimentaux révèle une différence significative, sur la majorité des paramètres analysés (temps de parcours, nombre d'arrêts et lissage des trajectoires), entre les deux conditions de vision. Ainsi, un téléopérateur qui bénéficie d'une caméra mobile va voir fortement diminuer son temps de déplacement, ses phases d'immobilisation, et va présenter des trajectoires plus régulières (plus lissées). 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). En effet, la figure 53 montre que les opérateurs placés dans une condition de vision mobile exploitent largement les avantages que leur offre cette situation, en utilisant des angles visuels bien plus conséquents (supérieurs à l'hémi-champ de la caméra à partir de 2 mètres de rayon de courbure) que ce que leur fournit une simple vision statique (ici, seulement 25°, si l'on considère que le centre d'attention de l'opérateur se situe plutôt dans l'hémi-champ de l'écran du côté duquel il fait virer le robot).



**Figure 53 :** Détail de la valeur des angles (en degrés) compris entre l’axe de la caméra et celui de la direction d’un robot suivant le modèle « plate-forme », en fonction des rayons de courbure de la trajectoire du robot (en mètres). Au fur et à mesure que le rayon de courbure diminue l’angle d’anticipation visuel sur la trajectoire augmente. Cette augmentation est géométriquement significative (angles supérieures à l’hémi-champ de la caméra) pour des virages inférieurs à 2 mètres de rayon.

Du reste, on peut noter que l’amélioration de la performance au cours des sessions est légèrement plus marquée dans la condition vision fixe. Cet effet, plus particulièrement présent sur le paramètre du nombre de collisions, pourrait s’expliquer par le fait que dans cette condition les sujets mémorisaient davantage d’indices environnementaux pour compenser leur absence de perception des repères de navigation, ceci au prix d’une élévation de leur charge de travail mental (Péruch *et al.*, 1996). Mais, cette acquisition ne parvient néanmoins pas à égaler l’avantage naturel apporté par le comportement anticipatoire. Ce qui justifie les raisons pour lesquelles 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 différenciait, 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 comparables, 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, pour les deux paramètres restants (nombre de collision et relation vitesse/courbure), on n'observe pas de différence entre la condition « mobile » implémentée suivant le modèle « plate-forme » et la condition « fixe ». Effectivement, même si les opérateurs placés en condition « plate-forme » tendent à produire moins de collisions contre les obstacles que ceux de la condition « fixe », cette différence n'apparaît pas comme étant statistiquement significative. Ce défaut dans la précision de réalisation de la tâche, amène à s'interroger sur l'efficacité d'implémentation de mécanismes d'anticipation visuo-motrice suivant une organisation différente du vivant. En effet, d'après les études neuroscientifiques, l'anticipation visuelle sur le déplacement semble davantage s'organiser depuis la tête jusqu'aux pieds. 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 (Patla *et al.*, 1999).

Du reste, le fait que ni la condition de vision « fixe », ni la condition de vision « mobile plate-forme » ne vérifient la « loi de puissance », semble montrer que dans cette dernière situation l'opérateur ne développe pas un contrôle naturel du mouvement. Cette constatation apparaît déjà au niveau de la simple analyse des caractéristiques géométriques des trajectoires du robot. En effet, l'évaluation du lissage des trajectoires révèle que, bien que la vision « mobile » exhibe plus de virages lissés que la vision « fixe », les deux conditions présentent un pourcentage d'occurrence de petits rayons de courbure non négligeable. Aussi, ces derniers ne peuvent en aucun cas suivre la « loi de puissance » puisqu'ils correspondent à des rotations sur place, lesquelles n'ont aucune réalité biologique. Ainsi, ces changements de directions en absence de translation vont créer du « bruit » dans la relation unissant la

géométrie et la cinématique du mouvement, lequel bruit pourrait être à l'origine de la non vérification de la « loi de puissance » en ce qui concerne ces deux modes de commande.

Dans le milieu des neurosciences, deux théories s'opposent quant à la genèse de cette relation mathématique de puissance. Alors que certaines théories s'appuient sur des facteurs biomécaniques périphériques (Gribble & Ostry, 1996 ; Wann *et al.*, 1988), d'autres font ressortir des facteurs nerveux centraux, voire corticaux, de la planification du mouvement (Massey *et al.*, 1992). Si l'explication de la « loi de puissance » est d'origine biomécanique, il apparaît normal qu'elle ne soit pas vérifiée dans notre situation de téléopération, étant donné que le système mécanique du robot a peu de chose à voir avec celui de l'homme. En revanche, si l'explication de cette loi est davantage à chercher au niveau d'un programme moteur central cela amènerait à une toute autre interprétation des résultats obtenus. En effet, ceci tendrait à mettre en évidence que l'opérateur placé en condition de vision « mobile plate-forme » (tout comme en condition « fixe ») modifierait bien ses schèmes moteurs par un processus à dominante d'accommodation, afin de les adapter aux propriétés morpho-fonctionnelles de la machine. Le fait que la « loi de puissance » soit vérifiée pour des biomécaniques aussi différentes que celle du bras (Lacquaniti *et al.*, 1983 ; Viviani & Schneider, 1991) et des membres pelviens (Vieilledent *et al.*, 2001) de l'homme, nous amène plutôt à envisager la seconde interprétation.

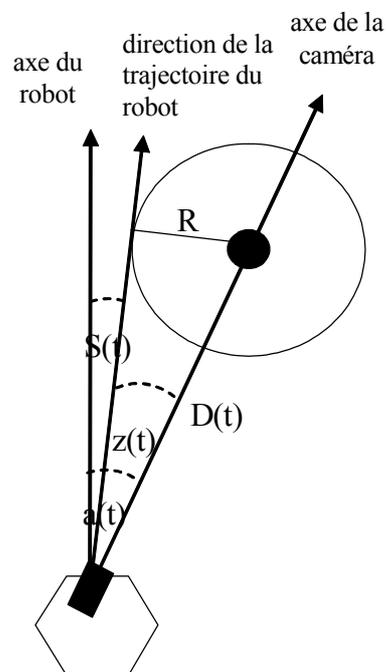
En définitive, l'irrégularité dans l'amélioration de la performance générale suite à l'implémentation d'une anticipation visuo-motrice de type non anthropomorphique peut s'expliquer par un manque de compatibilité entre l'architecture temporelle du programme moteur d'un tel modèle et celle de l'homme. Aussi pour pouvoir vérifier une telle hypothèse, il serait nécessaire d'implémenter ce même mécanisme d'anticipation visuo-motrice mais en veillant, cette fois-ci, à suivre une coordination spatio-temporelle plus fidèle au comportement humain. C'est cette architecture fonctionnelle anthropomorphe qui a été testée dans l'expérience suivante.

## **IV. Implémentation suivant un modèle anthropomorphique**

### **IV.1. Description du modèle « caméra »**

Cette seconde modélisation de l'anticipation visuelle est construite suivant une organisation spatio-temporelle inverse au modèle précédent. Ici, c'est l'axe d'orientation de la caméra qui va déterminer la trajectoire du robot. 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 « plate-forme », 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). Cette situation, tout en contraignant l'opérateur à conserver le repère de navigation dans le champ de la caméra, apporte à l'individu un contrôle visuel continu sur le repère le plus proche du robot, limitant ainsi les risques de collisions. La figure 54 schématise, vue d'en haut, la représentation géométrique de ce contournement de repère par le robot.



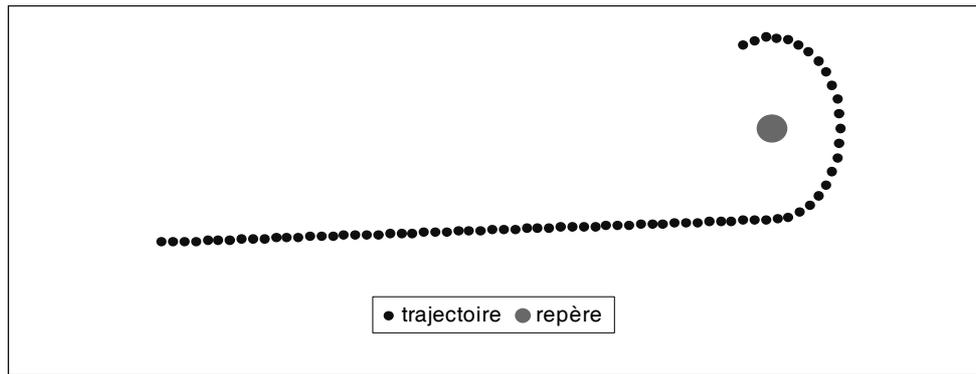
$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{a}(t) - \arcsin \left( \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{D}(t)} \right)$$

**Figure 54 :** Principe de la modélisation « caméra ». L'angle de navigation du robot (S) est défini par la différence entre l'angle (a), compris entre la direction de la caméra et celle de l'avant du robot, et l'angle (z), compris entre la direction de la caméra et un axe imaginaire tangent à l'orbite de sécurité (R). Cet angle (z) est calculé par règles trigonométriques telles que  $\sin z(t) = R / D(t)$ . D, la distance entre le robot et le repère de navigation, est obtenue par la vitesse linéaire (v) du véhicule rapportée au taux de variation d'angle de la caméra (a), tel que  $D = (v / (da / dt)) \sin a$ .

Selon ce modèle, si l'opérateur pointe la caméra toujours en direction du repère de navigation, 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 ( $z$ ), compris entre l'axe de la caméra et un axe imaginaire tangent à l'orbite de sécurité. Cet angle  $z$  est obtenu par relations trigonométriques telles que  $\sin z(t) = R / D(t)$ , où  $D$  correspond à la distance entre le robot et le repère. 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 :  $S(t) = a(t) - \arcsin (R / D(t))$ .

Lorsqu'on teste cet algorithme à partir d'un logiciel calcul, la simulation obtenue montre qu'un véhicule équipé d'une telle équation semblerait parfaitement capable d'enrouler un repère tout en restant à équidistance de lui (figure 55). Il reste maintenant à tester la validité de cette modélisation en condition de téléopération, compte tenu du bruit lié à l'interaction avec une entité humaine devant rediriger la caméra au fur et à mesure de la progression du robot. En effet, à la différence d'un mode totalement automatisé où l'on peut implémenter des algorithmes de vision artificielle permettant à la caméra de fixer précisément le repère de navigation lors du déplacement du robot, l'opérateur ne satisfera que grossièrement cette condition. En revanche, deux propriétés liées à un mode de contrôle semi-automatique pourront concourir à compenser en une certaine mesure ce défaut de précision. Premièrement, un opérateur humain n'a pas la nécessité absolue de cibler parfaitement le repère qu'il doit contourner. Au contraire, ses capacités d'adaptation sont telles qu'elles lui permettent d'ajuster successivement les rotations de caméra. Deuxièmement, par une propriété davantage matérielle venant supporter la précédente, qui est le fait que la largeur du champ optique horizontal de la caméra ( $50^\circ$ ) permet à l'opérateur une certaine marge d'erreur dans le ciblage du repère, sans que celui-ci ne sorte du champ visuel de la caméra. C'est d'ailleurs, grâce à la largeur du champ de caméra et à la dynamique lente de rotation, qu'il n'a pas été nécessaire d'implémenter l'équivalent d'un réflexe vestibulo-oculaire dans l'algorithme de pilotage (c'est-à-dire un mouvement compensatoire de caméra opposé au mouvement de rotation de la base). L'opérateur peut par exemple se contenter de visualiser le repère de navigation sur les extrémités de son terminal de visualisation, la rotation de la base n'engendrant ainsi qu'un déplacement du repère de cette position latérale à une position plus

centrale sur l'écran. Ensuite, l'opérateur n'a plus qu'à laisser dériver l'image du repère, par déplacement de la base, puis refixer, par commande de la caméra, ce dernier en périphérie de l'écran quand celui-ci en sort et ainsi de suite. En définitive, on comprend aisément que la trajectoire décrite dans la simulation de la figure 55 n'est davantage à prendre qu'à titre indicatif (puisque réalisée de manière automatique), mais ne présume en rien des contrôles effectués lors de la réalisation de la trajectoire d'un mobile contrôlé en mode semi-automatique.



**Figure 55 :** La simulation d'une trajectoire d'un robot équipé du « modèle caméra » montre qu'un tel véhicule pourrait parfaitement contourner un repère tout en restant à équidistance de ce dernier.

## **IV.2. Protocole expérimental**

### IV.2.1. Sujets

Une population présentant les mêmes caractéristiques que celle de l'expérience précédente a été choisie, afin de permettre une comparaison des résultats de cette seconde expérimentation avec ceux de la première. Ainsi, quatorze sujets âgés entre 25 et 35 ans ont participé à l'ensemble des quatre sessions expérimentales. Ces individus étaient séparés en deux groupes de conditions expérimentales indépendantes. Ils possédaient tous une vision normale ou utilisaient des verres correcteurs leur assurant une bonne vision. Tous étaient naïfs quant au sujet de l'expérimentation. L'ensemble de l'expérience a duré également une heure pour chaque sujet.

### IV.2.2. Conditions

Il y a avait, de nouveau, deux conditions expérimentales différentes de mobilité de vision. La condition contrôle de « vision fixe », où la caméra était maintenue immobile dans l'axe de la marche du robot. Et une seconde condition de « vision mobile d'anticipation », où la plate-forme n'était dirigée qu'indirectement par asservissement à l'orientation de la caméra selon le « modèle caméra ».

### IV.2.3. Procédure

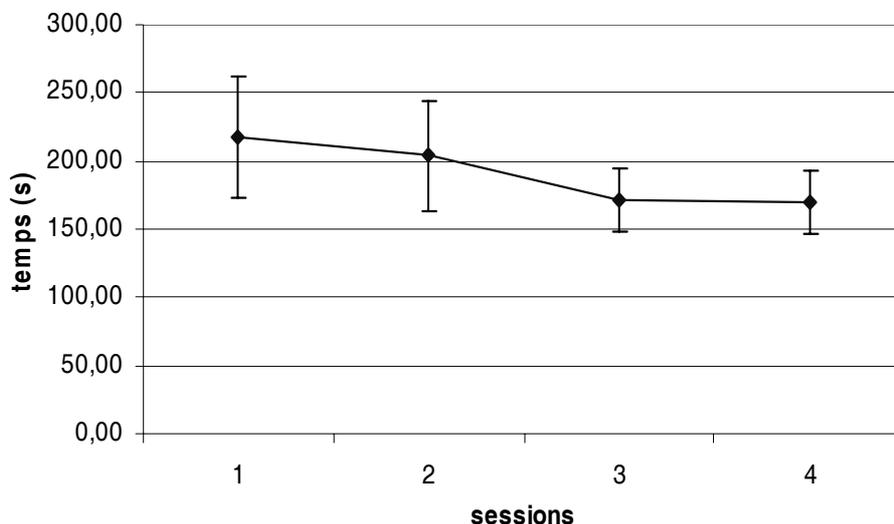
Toujours dans un soucis de pouvoir comparer les données entre-elles, la procédure expérimentale suivie dans cette expérience est rigoureusement la même que celle de l'expérience précédente. Ainsi, tous les sujets étaient placés en situation de téléopération, c'est à dire sans vision directe de l'environnement expérimental. Ils ont également débuté par une première phase d'entraînement qui leur a permis de se sentir plus à l'aise, de réaliser des déplacements curvilinéaires et de limiter les collisions avec l'environnement. Une fois ces critères atteints, ils ont entamé la phase de test proprement dite. Cette première partie aura durée à peu près une demi-heure.

Là encore, la tâche à effectuer lors de la phase de test était exactement la même que celle de l'expérience précédente. Celle-ci consistait à faire exécuter au véhicule téléopéré un parcours de slalom entre quatre balises. Le tracé de ce slalom était constitué comme précédemment par des virages de 20 à 180 degrés. Les dimensions générales du parcours ainsi que les espacements entre les balises ont, eux aussi, été conservés à l'identique. Ce trajet était réalisé une fois dans un sens et une fois dans le sens opposé d'une session à l'autre. La consigne donnée au sujet restait de réaliser le parcours le plus rapidement possible tout en conservant un bon niveau de précision (limitation des collisions). La performance a été évaluée sur chacune des sessions à partir du temps d'exécution du trajet, du nombre d'arrêts, du nombre de collisions avec les obstacles, du lissage des trajectoires et de la relation vitesse/courbure. Les résultats ont été traités par une analyse statistique de type ANOVA.

### IV.3. Résultats

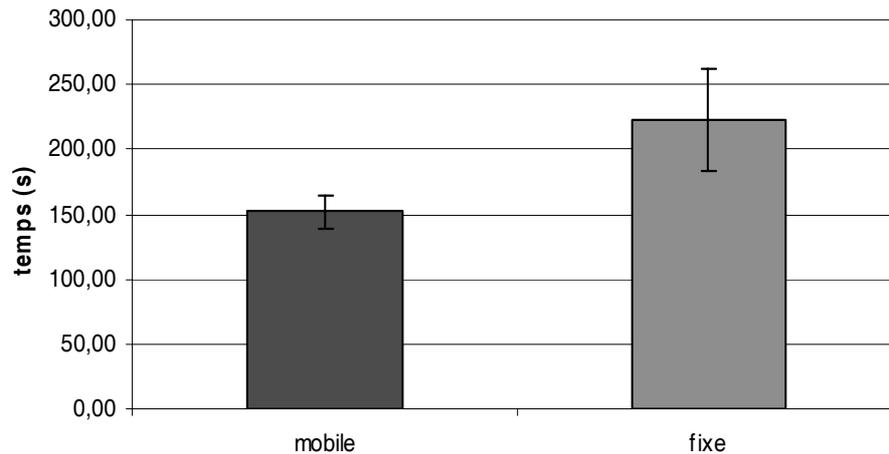
#### IV.3.1. Temps d'exécution du parcours

Premièrement, on ne constate pas de diminution significative ( $F [3, 36] = 1,88 ; NS$ ) du temps d'exécution du parcours au cours des sessions sur l'ensemble des deux conditions expérimentales (figure 56). Cette absence d'effet de session indiquerait que la performance de vélocité en condition d'anticipation visuo-motrice suivant le modèle « caméra » est relativement constante au cours du temps. En effet, l'analyse individuelle de l'évolution du temps d'exécution du parcours de la condition « caméra » ne montre pas de différence significative ( $F [3, 18] = 1,9 ; NS$ ).

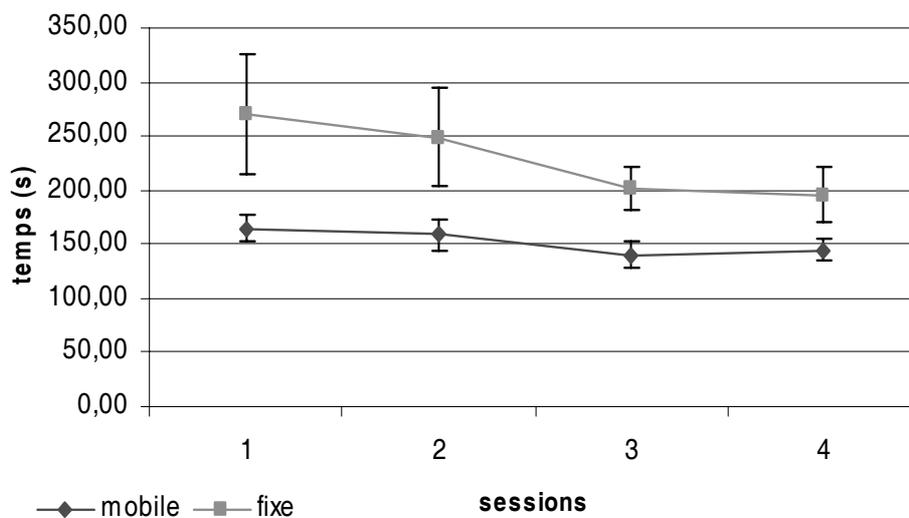


**Figure 56 :** Temps moyen d'exécution du parcours pour l'ensemble des deux conditions visuelles confondues suivant les quatre sessions expérimentales. Malgré une tendance à l'amélioration de la vitesse au cours des sessions, celle-ci n'apparaît pas comme statistiquement significative.

Deuxièmement, la figure 57 met en évidence un effet principal de la condition de vision ( $F [1, 12] = 7,58 ; p < 0,02$ ). 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 (152 secondes, en condition « modèle caméra ») que lorsque celle-ci reste dans une position déterminée (223 secondes, en condition « fixe »).



**Figure 57 :** Temps d'exécution du parcours en fonction de la condition visuelle de contrôle du robot sur l'ensemble de l'expérience. Les opérateurs sont significativement plus rapides ( $p < 0,02$ ) lorsque la caméra anticipe sur le déplacement (mobile) que lorsqu'ils possèdent une retour visuel stabilisé sur l'axe de l'avant du véhicule (fixe).

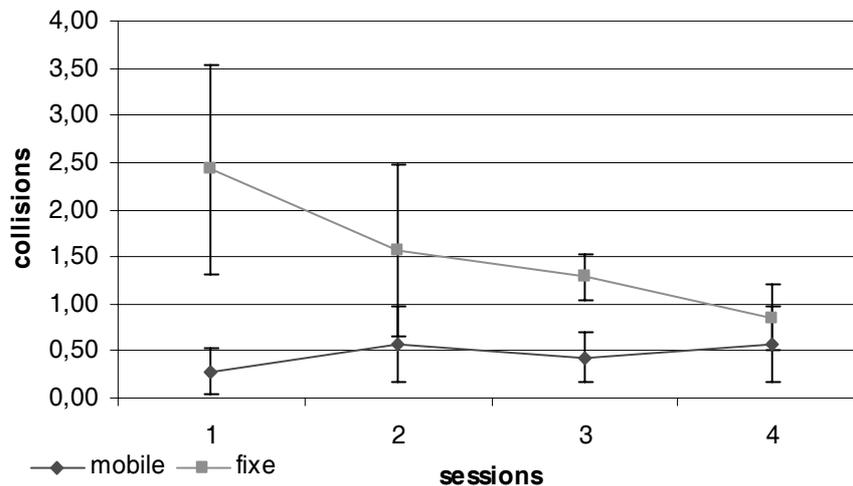


**Figure 58 :** Temps de parcours pour les deux conditions de mobilité de vision suivant les quatre sessions expérimentales. A noter que la condition de caméra mobile engendre un temps de déplacement plus court que la condition de caméra fixe quelle que soit la session, cette différence persistant de manière significative à l'ultime session ( $p < 0,03$ ).

A noter que cette différence significative est préservée au fil des sessions ( $F [1, 12] = 6,03$  ;  $p < 0,03$ , à la 4<sup>ème</sup> session) ce qui prouve, à nouveau, que l'entraînement à lui seul ne parvient pas à combler l'infériorité intrinsèque de la vision fixe par rapport à la vision mobile (figure 58).

#### IV.3.2. Nombre de collisions

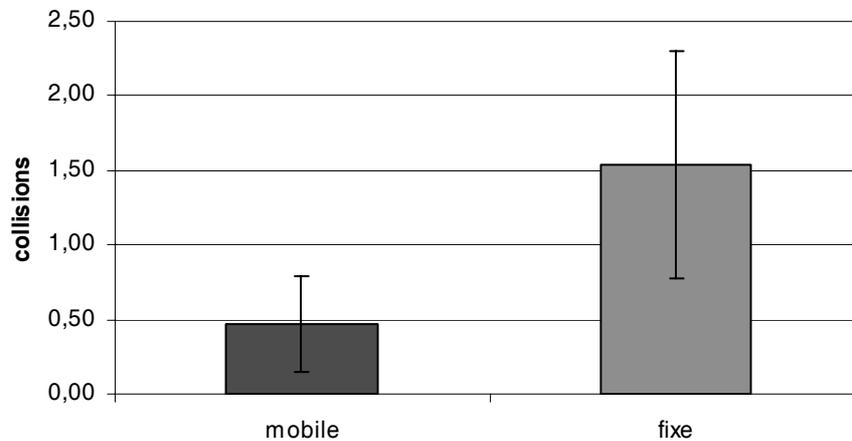
On ne constate toujours pas d'effet de session ( $F [3, 36] = 1,34 ; NS$ ), étant donné qu'il n'y a pas de diminution significative du nombre de collision avec l'augmentation de l'entraînement dans la condition « caméra », qui est déjà performante dès la première session (figure 59). De plus, à la différence du modèle « plate-forme », qui tend à diminuer sa performance au cours des sessions, le modèle « caméra » maintient son nombre de collision à un niveau faible tout au long de l'expérience. En revanche, on peut observer une reproductibilité de la tendance des opérateurs de la condition « fixe » à améliorer leur performance avec la pratique.



**Figure 59 :** Nombre moyen de collisions pour les deux conditions visuelles suivant les quatre sessions expérimentales. A remarquer la tendance de la condition « fixe » à produire moins de collisions au cours du temps, alors que la condition « mobile » tend, quant à elle, à maintenir une performance relativement constante au fil des sessions.

La différence principale, au niveau de ce paramètre du nombre de collision, entre les résultats de l'expérience précédente et ceux de la présente expérience vient de l'effet de la condition de vision. En effet, l'ANOVA montre que la quantité de collision contre les obstacles est statistiquement plus basse en condition de vision « mobile » qu'en condition de vision « fixe » ( $F [1, 12] = 5,52 ; p < 0,04$ ). Précisément, le nombre moyen de collision en vision « mobile » est de 0,4 contact, alors qu'il est de 1,3 contact en vision « fixe » (figure

60). Cette différence avec la précédente expérience est due au fait qu'un pattern visuo-moteur implémenté suivant un modèle « caméra » semble assurer une meilleure anticipation sur les obstacle à venir que lorsque celui-ci est implémenté suivant un modèle « plate-forme ».

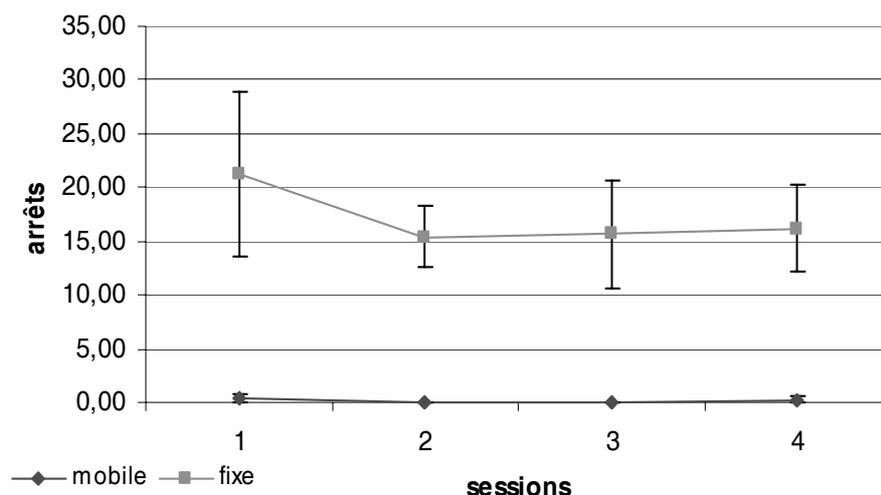


**Figure 60 :** Nombre moyen de collisions suivant la condition de mobilité de la caméra sur l'ensemble de l'expérience. Ce second paramètre mesurant le degré de précision dans l'efficacité de la commande du robot, met en évidence que celui-ci est statistiquement plus élevé lorsque l'anticipation visuelle est implémentée suivant le modèle « caméra », que lorsque le champ visuel est maintenu dans l'axe de déplacement du véhicule ( $p < 0,04$ ).

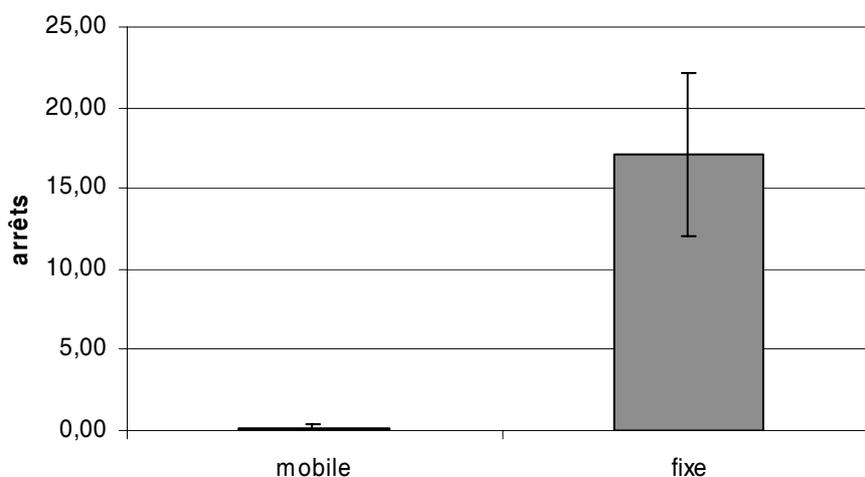
A remarquer, de plus, que cette différence significative entre la vision « fixe » et la vision mobile en modèle « caméra » est un phénomène relativement robuste puisqu'il se maintient encore à la troisième session expérimentale ( $F [1, 12] = 9,82 ; p < 0,01$ ). Les résultats de ce paramètre, associé à ceux du précédent, démontrent une plus grande régularité dans l'amélioration de l'efficacité globale suivant le modèle de vision mobile « caméra ».

#### IV.3.3. Nombre d'arrêts

A l'instar des résultats de l'expérience précédente, il n'y a pas d'effet de session au niveau de ce paramètre ( $F [3, 36] = 1,49 ; NS$ ). Ceci est dû, en partie, au fait que la performance de la condition « mobile » implémentée suivant le modèle « caméra » est déjà très élevée dès la première session et se maintient jusqu'à la dernière (figure 61).



**Figure 61 :** Nombre moyen d'arrêts pour les deux conditions de vision au cours des quatre sessions expérimentales. A remarquer le nombre quasi nul d'arrêts opérés en condition de vision mobile suivant le modèle « caméra », qui maintient une différence statistiquement significative constante avec la condition « fixe » dès la seconde session ( $p < 0,0002$ ).



**Figure 62 :** Nombre moyen d'arrêts en fonction de la condition visuelle de pilotage du robot sur l'ensemble de l'expérience. L'implémentation d'une anticipation visuelle sur le déplacement suivant un modèle « caméra » fournit à l'opérateur une nécessité massivement moins importante de s'arrêter, que s'il est placé dans une condition de vision fixe ( $p < 0,0003$ ).

De même, au niveau de la comparaison des conditions expérimentales on retrouve un effet massif en faveur de la vision mobile. Ainsi, tel que le montre la figure 62, le modèle

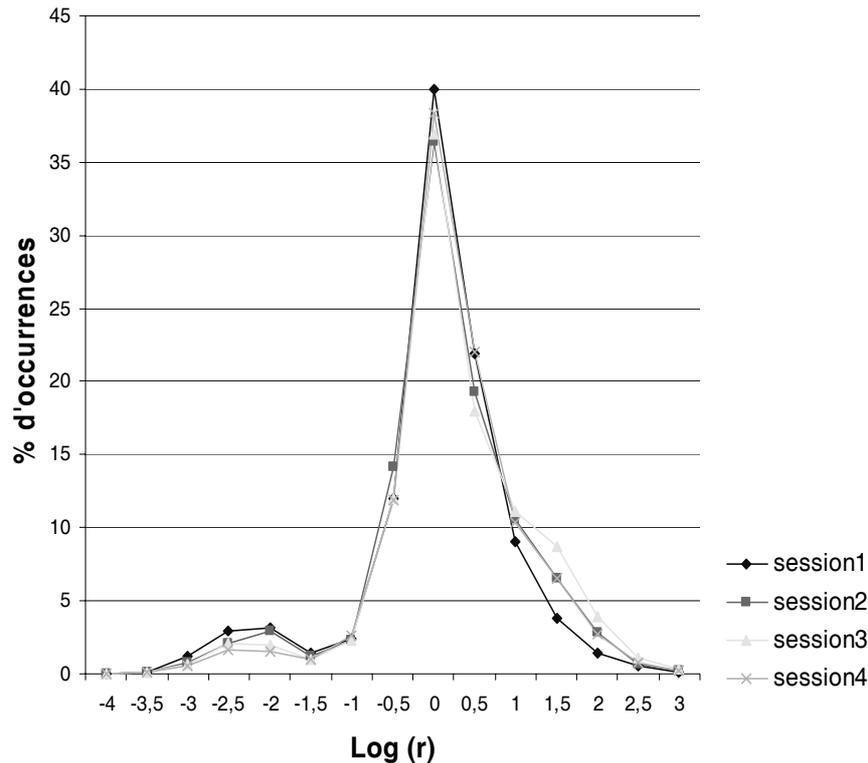
« caméra » affiche une propriété à réduire encore davantage l'occurrence d'immobilisation du véhicule (le nombre moyen d'arrêts est de : 17,4 pour la condition « fixe », et de 0,18 pour la condition « caméra »), grâce à une meilleure anticipation sur les trajectoires qu'en vision « fixe » ( $F [1, 12] = 26,15 ; p < 0,0003$ ).

Par ailleurs, l'atteinte d'une performance plateau de la vision « fixe » dès la seconde session et dont la valeur diffère significativement de la vision « caméra » ( $F [1, 12] = 26,78 ; p < 0,0002$ ) étaye l'idée de primauté de l'effet de condition sur l'effet de session.

#### IV.3.4. Lissage des trajectoires

Afin d'analyser ce paramètre, le même type d'équation que pour l'expérience précédente a été utilisé. Ainsi, le lissage des trajectoires a été évalué à partir de la fréquence de distribution des rayons de courbure de déplacement du véhicule (Péruch & Mestre, 1999). Ces rayons sont également exprimés en logarithme décimal. Les valeurs négatives de logarithmiques de  $r$  correspondent à des virages serrés, alors que des  $\log (r)$  positifs ou nuls correspondent à des trajectoires curvilinéaires, à l'échelle du robot.

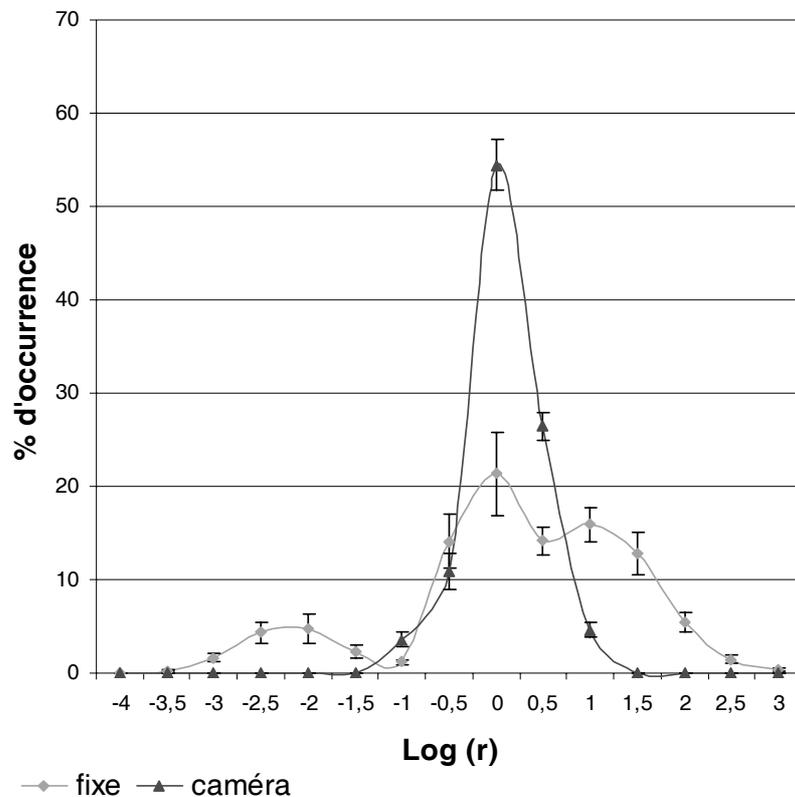
En première analyse, on constate un effet significatif du facteur catégorie ( $F [14, 168] = 177,49 ; p < 0,00001$ ) indiquant, de nouveau, que la répartition des rayons de courbure n'est pas monotone. En effet, on retrouve les deux pics caractéristiques d'une distribution bimodale de ces rayons (figure 63). Le grand pic, correspondant aux valeurs de rayons de courbure voisines de 1 mètre, est toujours centré sur un logarithme du rayon de courbure égale à 0. Etant donné les dimensions de l'espace expérimental et les propriétés dynamiques du véhicule, ce pic représente les trajectoires curvilinéaires du déplacement du robot. Le deuxième pic de plus petite taille se situe dans les valeurs négatives, encore localisé sur des valeurs logarithmiques de -2,5 et -2 (figures 63 et 64). A l'inverse du précédent pic, il identifie les trajectoires pour lesquelles les sujets ont exécuté une rotation avec une vitesse linéaire faible, voire nulle. A noter que l'augmentation du nombre d'occurrences observée pour des valeurs de logarithme très élevées (1 et 1,5 sur les figures) dans l'expérience précédente, est ici beaucoup moins évidente. Du reste, comme il s'agit là encore de lignes droites, elles n'ont pas davantage de pertinence pour la suite de l'analyse.



**Figure 63 :** Distribution moyenne des logarithmes des rayons de courbure, exprimée en pourcentage du nombre total d'occurrences, en fonction des sessions expérimentales, pour l'ensemble des deux conditions visuelles. Le plus grand pic (centré sur une valeur de 0) correspond aux grandes courbes de trajectoire du robot, alors que le plus petit pic (centré sur des valeurs de -2,5 et -2) correspond à des virages effectués avec une très petite vitesse linéaire.

En revanche, on ne rencontre ni d'effet significatif de session ( $F [3, 36] = 0,95$  ; NS) ni d'interaction entre le facteur catégorie et le facteur session ( $F [42, 504] = 1,12$  ; NS). Ainsi, si les petits rayons de courbures (valeurs de -2,5 et -2) diminuent bien de 3% à 1,6% d'occurrences lorsqu'on passe de la 1<sup>ère</sup> à la 4<sup>ème</sup> session, les trajectoires curvilinéaires (valeur de 0) auraient également tendance à baisser, puisque qu'elles passent de 40% à 38% d'occurrences. Ces deux effets opposés mettent en évidence une absence significative d'amélioration du lissage des trajectoires au cours des sessions. Ceci s'explique essentiellement par la condition de vision mobile implémentée suivant le modèle « caméra » qui apparaît très peu sensible à l'effet de session sur ce paramètre ( $F [3, 18] = 1,06$  ; NS) comme sur les précédents. Cette petite particularité, ajoutée au fait que le modèle caméra

s'avère assez efficace, semble indiquer qu'un robot fonctionnant suivant cette architecture, est plus naturellement utilisé par l'opérateur.



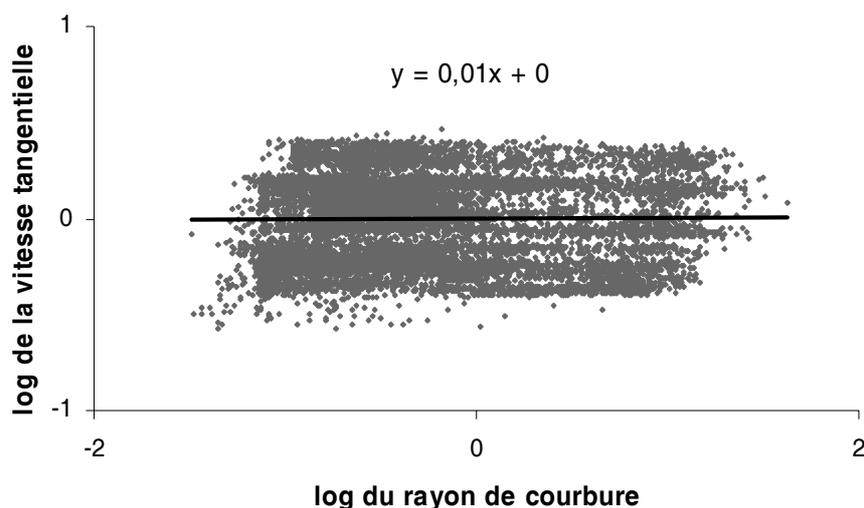
**Figure 64 :** Distribution moyenne des logarithmes des rayons de courbure, exprimée en pourcentage du nombre total d'occurrences, en fonction des deux conditions expérimentales de vision. Le pourcentage d'occurrences des petits rayons de courbure est largement significativement plus bas ( $p < 0,0008$ ) et celui des grands rayons de courbure massivement significativement plus haut ( $p < 0,00001$ ) dans le mode de contrôle suivant le modèle « caméra », en comparaison avec le mode de contrôle en vision « fixe » du robot.

Enfin, il apparaît un effet d'interaction significatif entre la condition de vision et le facteur catégorie ( $F [14, 168] = 48,14 ; p < 0,00001$ ). Ce résultat est illustré sur la figure 64 qui met clairement en évidence que le pourcentage d'occurrences des petits et grands rayons de courbure n'est pas le même selon la condition visuelle. Ainsi, le grand pic, correspondant aux trajectoires curvilinéaires, est massivement significativement plus élevé en vision mobile qu'en vision fixe ( $F [1, 12] = 69,31 ; p < 0,00001$ ). Inversement, le petit pic, représentant les rotations sur place, est largement significativement plus bas en vision mobile qu'en vision fixe ( $F [1, 12] = 19,90 ; p < 0,0008$ ). De reste, ces différences significatives entre les

conditions sont préservées jusqu'à la dernière session aussi bien pour les trajectoires curvilinéaires ( $F [1, 12] = 34,41 ; p < 0,0001$ ) que pour les rotations sur place ( $F [1, 12] = 23,74 ; p < 0,0004$ ). Ces données viennent confirmer que la vision mobile d'anticipation sur le déplacement fournit à l'opérateur une meilleure information sur le placement du véhicule pour négocier la trajectoire à venir, et que l'avantage apporté par ce mécanisme visuo-moteur perdure au cours du temps.

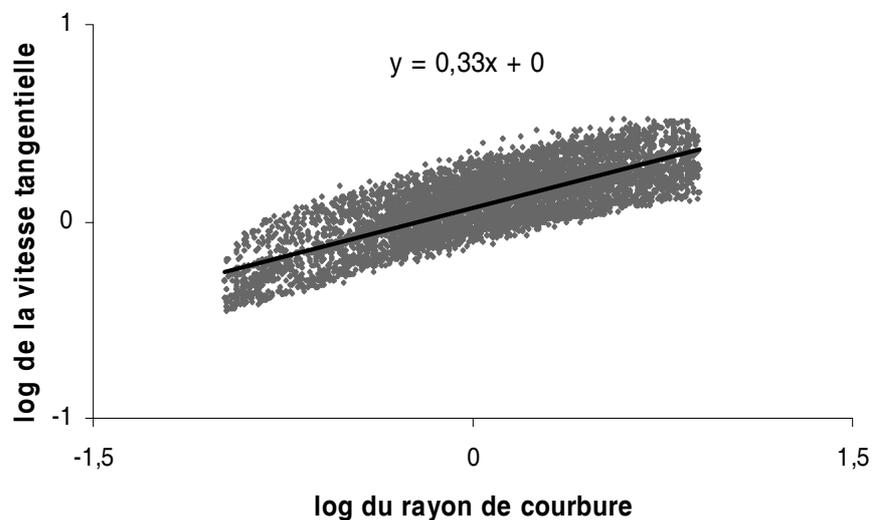
#### IV.3.5. Relation vitesse/courbure

Pour ce dernier paramètre, nous avons opéré aux mêmes traitements que ceux réalisés à la précédente expérience. Ainsi, l'appréciation du contrôle du mouvement a été effectuée à partir du calcul des rayons de courbure et vitesses tangentielles de déplacement du robot. Le coefficient de corrélation et la pente de régression ont été analysés statistiquement, après qu'ils aient été transformés selon une échelle logarithmique. Enfin, à partir des valeurs de rayon et de vitesse obtenus au cours des divers essais, nous avons dressé une représentation graphique normalisée pour chaque condition expérimentale (figures 65 et 66). Nous rappelons que pour qu'une relation courbure/vitesse suive la « loi biologique de puissance », le log de la vitesse doit être proportionnel au tiers du log du rayon, soit :  $\log v = 1/3 \log r + k$ .



**Figure 65 :** Représentation logarithmique et normalisée de la relation entre rayons de courbure et vitesses tangentielles pour l'ensemble des essais de la condition vision fixe.

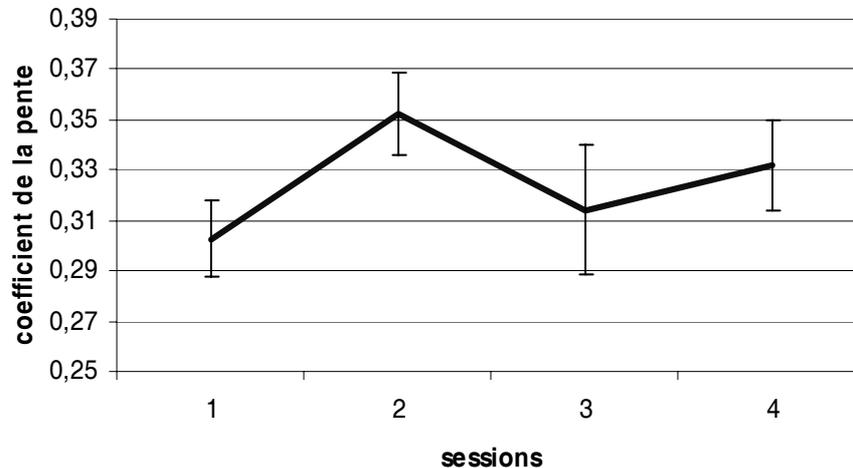
Les données obtenues dans la condition de caméra « fixe » confirment ceux de la première expérience. A savoir qu'il n'y a toujours pas de corrélation statistiquement significative entre vitesses tangentielles et rayons de courbure lorsque les opérateurs se trouvent placés dans cette situation de vision statique ( $R = 0,14$  ; N.S). La pente de la droite de régression expose le même profil plan (figure 65), différant ainsi significativement de celui attendu dans la « loi de puissance » ( $t = 30,61$  ;  $p < 0,0001$  pour  $ddl = 6$ ). Enfin, l'entraînement ne semble modifier en rien ce pattern général, puisque tant le coefficient de corrélation ( $F [3, 18] = 0,78$  ; N.S) que le coefficient directeur de la droite ( $F [3, 18] = 0,54$  ; N.S) ne sont sujets à un effet de session.



**Figure 66 :** Représentation logarithmique et normalisée de la relation entre rayons de courbure et vitesses tangentielles pour l'ensemble des essais de la condition vision mobile caméra.

Les résultats sont tout autres pour la condition de vision « mobile » implémentée selon le modèle anthropomorphique « caméra ». Tout d'abord, on constate que la relation qui unit vitesses tangentielles de déplacement et rayons de courbure n'est pas indépendante comme dans une condition « fixe » mais, au contraire, est significativement corrélée ( $R = 0,76$  ;  $p < 0,001$ ). Ainsi, on observe très nettement sur la figure 66 que plus le rayon augmente plus la vitesse s'élève proportionnellement. Le plus remarquable est que la pente du pattern obtenu ne diffère pas statistiquement du rapport d'1/3 pour l'ensemble des sujets de cette condition ( $t = 0,12$  ; N.S pour  $ddl = 6$ ). A noter que l'atteinte d'un coefficient directeur voisin d'1/3

pour la droite de régression s'effectue progressivement au fil des sessions ( $F [3, 18] = 6,25$  ;  $p < 0,005$ ) par un processus d'allure convergente (figure 67). En revanche, le coefficient de corrélation reste relativement constant au cours du temps ( $F [3, 18] = 0,24$  ; N.S).



**Figure 67 :** Evolution du coefficient de la pente de la droite de régression du log des vitesses tangentielles rapporté au log des rayons de courbure au cours des sessions expérimentales, pour la condition « caméra ». A remarquer la convergence progressive des valeurs vers 1/3 avec le temps.

Enfin, si l'on compare les deux conditions de vision entre-elles, on relève bien évidemment des différences largement significatives. Ainsi, les coefficients de corrélation de la condition vision « mobile caméra » sont très supérieurs à ceux de la condition vision « fixe » ( $F [1, 12] = 68,48$  ;  $p < 0,0001$ ). De même, les pentes des droites de régression sont bien plus significatives lorsque l'opérateur bénéficie de cette implémentation visuo-motrice anthropomorphiquement architecturée que lorsqu'il en est privé ( $F [1, 12] = 54,95$  ;  $p < 0,0001$ ).

#### IV.4. Discussion

Cette expérience a consisté à évaluer les capacités d'un téléopérateur à contrôler le déplacement d'un robot mobile, lorsque ce dernier est équipé d'un mécanisme d'anticipation visuo-motrice proche de celui de l'homme. Pour réaliser cette évaluation, une condition de vision « mobile », le modèle « caméra », a été comparée à une condition de vision « fixe » au

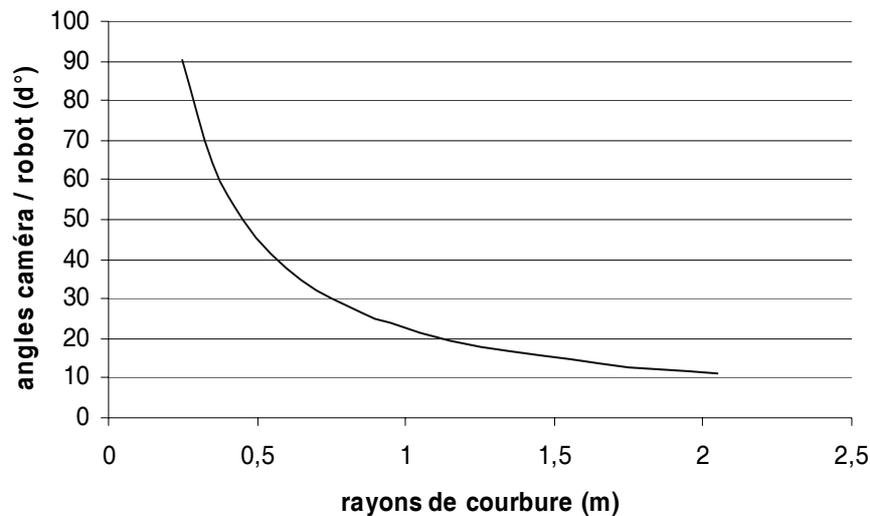
cours de quatre sessions expérimentales successives. Dans le modèle « caméra », l'opérateur n'a pas directement commandé le déplacement de la plate-forme, mais la direction de la caméra. Ici, la trajectoire du robot était asservie à l'orientation de la caméra suivant l'algorithme développé dans la partie IV.1. Ainsi, la grande différence entre la vision mobile suivant un modèle « plate-forme » et celle suivant un modèle « caméra » est, en plus du fait que ce dernier base son déplacement sur une fixation de repère, que le premier a une organisation visuo-motrice orientée de bas en haut (plate-forme → caméra) alors que l'architecture fonctionnelle du second est de haut en bas (caméra → plate-forme). En revanche, la condition de vision « fixe » est restée à l'identique de l'expérience précédente, c'est-à-dire avec la caméra immobile, l'opérateur ne commandant que la plate-forme.

Avec cette nouvelle condition, bien qu'on retrouve une certaine tendance à l'amélioration de la performance au fil des sessions (toujours principalement au niveau des deux premières), celle-ci n'apparaît statistiquement significative sur aucun des paramètres enregistrés. Cette absence d'effet de session, plus uniformément démontré à ce qu'il en avait été dans la précédente expérience, signifie que les opérateurs sont arrivés à s'approprier plus rapidement les caractéristiques du robot dans les conditions de la présente expérience. Or, étant donné que la vitesse d'acquisition d'un système renseigne sur la nature du processus dominant impliqué dans cette acquisition (Rabardel, 1993b), cette observation est un premier argument en faveur du fait que l'implémentation d'un mécanisme d'anticipation suivant le modèle « caméra » accentue l'assimilation du robot par l'opérateur.

Le second résultat de cette expérience est de révéler qu'une anticipation visuo-motrice de type « caméra » assure une amélioration significative sur la totalité des paramètres analysés (temps de parcours, nombre d'arrêts, nombre de collisions, lissage des trajectoires et relation vitesses/courbures), en comparaison avec la condition de vision « fixe ». Ainsi, avec ce modèle d'anticipation l'efficacité du téléopérateur semble accrue tant sur le domaine de la rapidité d'exécution que sur celui de la précision du déplacement. Cette supériorité est attribuable à deux phénomènes. Le premier, déjà souligné dans la précédente expérience, provient des propriétés intrinsèques au réflexe implémenté, qui sont un couplage entre la capacité d'anticiper temporellement sur l'action à venir et une augmentation du champ visuel fonctionnel de l'opérateur (Rybarczyk *et al.*, 2004). La quantification de la modulation de ce champ visuel fonctionnel relativement à la trajectoire du robot est détaillée dans la figure 68.

Le deuxième phénomène rend compte plus spécifiquement du niveau d'appropriation de la machine par l'opérateur. En effet, on constate des différences beaucoup plus franches et élevées dans la comparaison entre vision « fixe » et vision « mobile », lorsque cette dernière

est implémentée suivant un modèle de « type humain ». 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, l'immobilisation quasi nul du véhicule et le lissage des trajectoires drastiquement plus significatif en condition « caméra » que « fixe », témoignent d'une certaine supériorité d'aisance des opérateurs à piloter un robot fonctionnant suivant un modèle « caméra » plutôt que « plate-forme ».



**Figure 68 :** Détail de la valeur des angles (en degrés) compris entre l'axe de la caméra et celui de la direction d'un robot suivant le modèle « caméra », en fonction des rayons de courbure de la trajectoire du robot (en mètres). Au fur et à mesure que le rayon de courbure diminue l'angle d'anticipation visuel sur la trajectoire augmente. Cette augmentation est géométriquement significative (angles supérieures à l'hémi-champ de la caméra) pour des virages inférieurs à environ 1 mètre de rayon.

Ces différences entre les deux modes de vision mobile pourraient s'interpréter, en première approche, par le fait que le modèle « caméra » a davantage été conçu dans l'optique d'un contournement de repères que le modèle « plate-forme », ce dernier étant plus destiné à la réalisation de trajectoires courbes. Cependant, même si cet aspect technique a certainement influencé ce résultat, il n'explique pas pour autant la totalité de la différence. En effet, la similarité entre le pattern de réponse visuo-moteur suite à la réalisation d'une trajectoire courbe (Grasso et al., 1998) et celui suite à un contournement de repères (Grasso et al., 1998), montre que ces deux types d'action ne sont pas si différentes. Ainsi, les deux modèles de

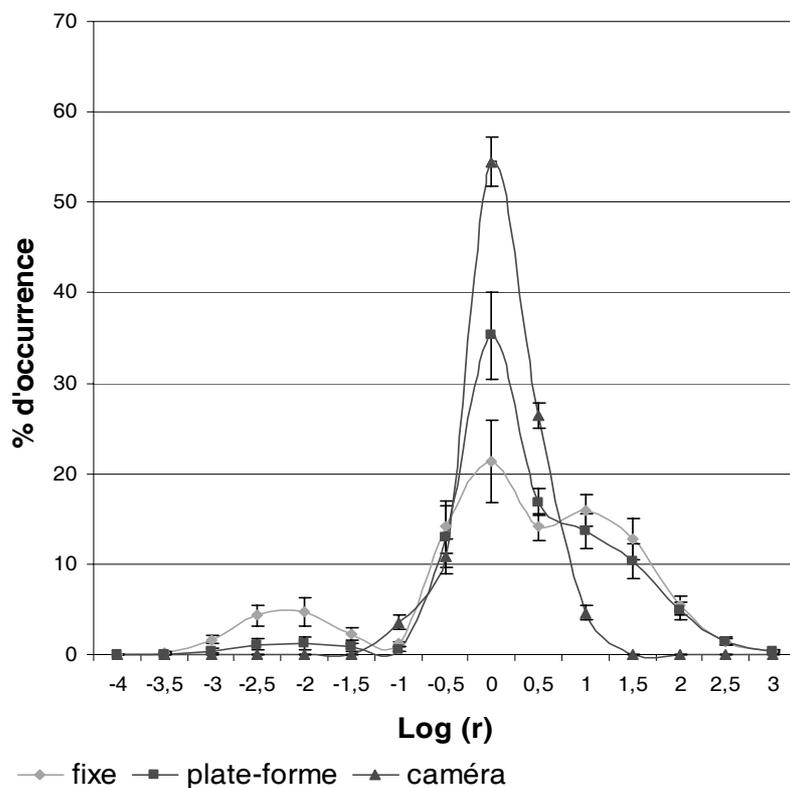
vision mobile devant être aussi performant dans la tâche expérimentale, on peut en déduire que la supériorité du modèle « caméra » viendrait d'une plus grande compatibilité entre l'architecture temporelle du programme moteur de ce modèle et celle de l'homme.

Le dernier paramètre analysé confirmerait d'ailleurs une telle interprétation. En effet, l'analyse de la relation entre rayons de courbure et vitesses tangentielles de déplacement montre que, c'est seulement dans la condition de vision « mobile » implémentée selon le modèle anthropomorphique « caméra » que l'opérateur parvient naturellement à faire exécuter au robot une cinématique de mouvement respectant la « loi de puissance ». Ce caractère naturel dans le contrôle du déplacement s'avère encore accentué par le fait que la relation de proportionnalité entre rayons et vitesses semble s'acquérir automatiquement, par convergence de plus en plus précise au cours des sessions vers le fameux rapport d'un tiers. Ainsi, ce coefficient paraît correspondre à une sorte de valeur attractrice dont l'opérateur placé en condition de vision « mobile caméra » ne peut se défaire. Cette reproduction d'une loi d'origine purement biologique dans un système hybride homme-machine constitue donc bien une preuve flagrante d'assimilation du fonctionnement du robot dans les schèmes initiaux de l'opérateur. En effet, dans notre situation expérimentale on ne peut imputer l'émergence de cette relation à de quelconques facteurs de similarité mécanique, le robot mobile ayant une architecture structurale fort différente de celle des membres locomoteurs de l'homme. Pour conclure, le fait que l'opérateur parvienne à s'approprier le robot par un processus à dominante d'assimilation lorsque ce dernier présente une stratégie visuo-motrice anthropomorphique, validerait notre modèle d'application de l'approche piagétienne au phénomène d'adaptation de l'homme à la machine.

## **V. Conclusions**

Sur un plan ergonomique, le résultat majeur de ces deux expériences est de révéler qu'implémenter sur un robot des mécanismes inspirés des comportements humains, contribue à une élévation du niveau général d'adaptation de l'opérateur à la machine. Ceci est vrai aussi bien dans le domaine de l'efficacité que de l'effort psychomoteur. En effet, la vitesse et la précision d'exécution du déplacement s'est avérée supérieure lorsque le robot était équipé du mécanisme biologique d'anticipation visuo-motrice. De même, la régularité du mouvement, marqueur comportemental de l'effort psychomoteur, était systématiquement meilleure dans les conditions de vision mobile à une situation où le robot conservait un angle visuel fixe plus classiquement utilisé en robotique.

De plus, un deuxième objet de cette étude a consisté à appréhender jusqu'à quel point le mécanisme biologique implémenté doit respecter l'architecture fonctionnelle humaine, afin d'assurer le meilleur niveau d'adaptation de l'homme au système de téléopération. Pour répondre à cette question, nous avons comparé les résultats obtenus par implémentation de l'anticipation visuo-motrice selon une organisation fonctionnelle de type humaine (approche anthropomorphique) avec ceux où l'anticipation est implémentée selon un mode de couplage caméra-robot différent du modèle humain (approche non anthropomorphique). Si les différences se sont révélées moins évidentes que par comparaison entre une condition dotée du mécanisme d'anticipation versus une condition non équipée de ce mécanisme, elles n'ont pas pour autant toutes disparues.



**Figure 69 :** Distribution moyenne des logarithmes des rayons de courbure, exprimée en pourcentage du nombre total d'occurrences, en fonction des trois conditions expérimentales de vision. Le pourcentage d'occurrences des petits rayons de courbure est significativement plus bas ( $p < 0,04$ ) et celui des grands rayons de courbure significativement plus haut ( $p < 0,0006$ ) dans le mode de contrôle suivant le modèle « caméra », en comparaison avec les deux autres modes de contrôle du robot.

Ainsi, la régularité du déplacement, mise en évidence par le calcul du lissage des trajectoires, souligne une différence majeure entre la nature du pilotage via une architecture anthropomorphe versus non anthropomorphe. En effet, on remarque sur la figure 69, que la répartition entre les grands et les petits rayons de courbure n'est pas la même suivant le modèle « plate-forme » ou le modèle « caméra ». Ainsi, le grand pic est significativement plus élevé en condition « caméra » qu'en condition « plate-forme » ( $F [1, 12] = 21,10$  ;  $p < 0,0006$ ), cette différence se maintenant significative jusqu'à l'avant dernière session expérimentale ( $F [1, 12] = 36,88$  ;  $p < 0,0001$ ). Alors que les rotations sur place sont significativement plus nombreuses en condition « plate-forme » que « caméra » ( $F [1, 12] = 5,63$  ;  $p < 0,04$ ).

Si cette différence est à moduler au vu de l'implémentation technique des deux modèles, et en particulier par le fait que le modèle « caméra » est conçu de telle sorte à limiter les petits rayons de courbure, ce phénomène n'explique pas la supériorité massive des grands rayons de courbure dans la condition « caméra » par rapport à la condition « plate-forme ». Cette dernière différence semble davantage s'interpréter par le fait que lorsque l'opérateur à un contrôle direct sur la direction de son axe visuel (modèle « caméra »), il bénéficie d'une meilleure anticipation sur la localisation du repère à venir, ce qui réduit sa nécessité à immobiliser le véhicule, tourner sur place pour explorer l'environnement et effectuer un trajet rectiligne jusqu'à un point stratégique du parcours. On comprend bien, en effet, que ce dernier pattern de déplacement va limiter considérablement la réalisation de grands rayons de courbure, sa représentation la plus caricaturale étant la condition « fixe ».

Cette qualité de lissage des trajectoires, fort distincte entre les conditions, est à l'origine de la différence la plus conséquente entre l'implémentation d'un mécanisme d'anticipation visuo-motrice selon un mode de couplage caméra-robot anthropomorphique versus non anthropomorphique. Celle-ci s'exprime au niveau de la relation entre la géométrie et la cinématique du véhicule. Ainsi, alors que ni dans la condition de vision « fixe » ni dans celle de vision « mobile plate-forme » l'opérateur ne respecte une dynamique de contrôle du robot suivant la « loi biologique de puissance », ceux placés dans une configuration de vision « mobile caméra » observe naturellement un comportement locomoteur obéissant à cette relation de puissance. Ce phénomène semble lié au fait que les sujets en vision « mobile caméra » ne développent que des mouvements essentiellement lissés, contrairement aux deux autres conditions pour lesquelles la relation vitesse/courbure est parasitée par l'exécution de changement de direction en absence de translation. De telles observations confirmeraient que plus l'implémentation d'un mécanisme d'inspiration humaine est fidèle à son modèle

biologique plus l'opérateur tendrait à développer une stratégie de contrôle identique à celle qu'il applique à son propre corps.

Ces dernières analyses soulignent l'importance de la qualité de l'implémentation du mécanisme de type humain quant à la nature du processus d'adaptation qu'il met majoritairement en jeu. D'après nos résultats, l'adaptation homme-machine en condition « anthropomorphique » s'effectuerait bien par un processus à dominante d'assimilation. Inversement, étant donné que le modèle « plate-forme » parvient à un niveau d'efficacité non significativement différent du modèle « caméra », on peut en déduire que les opérateurs placés dans cette condition « non anthropomorphe » compensent leur impossibilité de mise en œuvre du processus d'assimilation par un accroissement d'accommodation, leur assurant un niveau final d'adaptation relativement identique à la situation « anthropomorphe ».

Cette favorisation de mise en jeu d'un processus d'assimilation en condition « anthropomorphique » s'expliquerait par la similarité entre l'organisation spatio-temporelle du couplage caméra–plate-forme du robot et le couplage naturel regard–locomotion de l'homme. 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 (Patla *et al.*, 1999). 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).

Enfin, de nos résultats finaux nous pouvons tirer deux conclusions sur un plan plus théorique. Premièrement, les données recueillies 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). Deuxièmement, la reproduction de la « loi de puissance » dans le cadre d'une action médiatisée par un artefact mécanique, nous amène à une explication neuroscientifique de ce phénomène non pas en terme de facteurs biomécaniques périphériques (Gribble & Ostry, 1996 ; Wann *et al.*, 1988),

mais comme relevant bien d'un modèle interne de planification du mouvement propre à l'homme (Viviani & Schneider, 1991 ; Massey *et al.*, 1992).

## Conclusions générales

Si un engin de téléopération est finalement un instrument au même titre que d'autres artefacts tel qu'un bâton, râteau, automobile..., c'est-à-dire dans le sens où il va médiatiser l'activité humaine (Gaillard, 1993), il revêt cependant une dimension fortement idiosyncrasique. Tout d'abord, le dispositif de contrôle d'un système de téléopération est généralement beaucoup plus complexe à utiliser que la plupart des outils ordinaires. L'enclenchement de boutons simultanément avec un nombre de combinaisons parfois considérable peut constituer, par exemple, un obstacle à la bonne maîtrise du système (Gray & Wilson, 1988). Il s'ajoute à cette complexité le fait que, par définition, un opérateur placé dans une situation de téléopération n'a pas de contact physique direct avec l'outil, situé dans l'espace de travail. Cette absence de continuité physique entre le corps de l'opérateur et l'engin téléopéré va générer des appauvrissements sensoriels dont les conséquences sont plus ou moins préjudiciables à l'accomplissement de la tâche (Terré, 1990). De même, la distance engendre des délais de transmission des commandes, lesquelles sont exécutées par la machine selon des règles de fonctionnement qui lui sont propres et qui peuvent, au final, fortement perturber l'opérateur (Vercher *et al.*, 1989).

Ces singularités nous ont tout naturellement amené à la question de savoir si, malgré l'ensemble de ces contraintes, un individu était encore capable de s'approprier un engin de téléopération, au même titre qu'un outil plus classique. Afin, d'appréhender clairement la notion d'appropriation nous nous sommes basés sur le concept piagétien d'adaptation. En effet, l'incongruité de la situation de contrôle à distance à laquelle est exposé l'individu nécessite de sa part un effort adaptatif. Celui-ci est accompli par la mise en jeu de schèmes. Une partie de ces schèmes sont déjà présents chez l'individu, les autres sont créés pour répondre aux caractéristiques de la situation nouvellement rencontrée. C'est ainsi qu'il est possible de décomposer l'adaptation d'un humain à une machine en processus assimilateurs, lorsque l'individu emploie des schèmes préexistants, et processus accommodateurs, quand de nouveaux schèmes sont construits, pour étudier la manière dont l'opérateur s'approprie le système de téléopération. Cette appropriation peut être mise en évidence sur un plan cognitif et/ou sensori-moteur, sachant que chacun de ces niveaux contribue à la construction de l'autre

et qu'il est donc relativement difficile de les dissocier. Néanmoins, la majorité des travaux concernant la téléopération se sont davantage attachés à mettre en évidence des preuves d'appropriation d'ordre représentationnel plutôt que sensori-moteur (Rabardel, 1993a ; Poyet, 1989 et 1993). Pourtant, ce dernier niveau d'analyse avait déjà témoigné de son intérêt pour la recherche sur l'appropriation des appareillages techniques destinés à suppléer les capacités perceptives (Lenay *et al.*, 1997 et 2000 ; Hanneton *et al.*, 1999). Ces études ont, entre autre, permis de montrer que la perception de l'environnement n'est plus seulement corrélée à l'individu, mais à cette nouvelle entité « homme-machine » possédant sa propre dynamique et dimension spatiale (Lenay *et al.*, 2001). Aussi, l'enjeu de notre recherche a donc été, à l'instar de ces travaux, de révéler l'existence de cette unité sensori-motrice entre l'homme et la machine lorsque cette dernière est, cette fois-ci, contrôlée à distance.

Cette évaluation des capacités d'appropriation d'un engin de téléopération par un opérateur humain est une problématique centrale dans la conception d'un système de Coopération Homme-Machine (CHM). En effet, la présence de l'entité humaine, avec ses particularités propres, dans la boucle de contrôle du système pose le problème de son interfaçage et interaction avec l'entité mécanique. Aussi, même si l'on dispose de modèles pour caractériser cette interaction (Rasmussen, 1986), il est encore difficile d'aboutir à un consensus général quant à savoir ce qu'il faut automatiser et ce qui doit rester sous le contrôle direct de l'homme (Parasuraman, 2000). Un moyen de parvenir à répondre à cette question majeure est de s'intéresser aux travaux réalisés dans le domaine des prothèses sensorielles (Bach-y-Rita, 1972). Ces études montrent, effectivement, que pour qu'un tel artefact soit utilisé de manière efficace, il est nécessaire que celui-ci soit parfaitement intégré au fonctionnement sensori-moteur de son utilisateur. Ainsi, si un artefact, quel qu'il soit, doit assurer à l'individu de nouvelles fonctionnalités, il faut veiller à ce que celles-ci préservent toujours l'intégrité du bouclage sensori-moteur pour pouvoir espérer une réelle adaptation humaine. Il en résulte que la base de l'émergence d'un phénomène d'appropriation d'un dispositif technique, ne résiderait pas tant dans une amplification des capacités sensorielles ou motrices prises indépendamment, mais dans l'adéquation de la conséquence sensorielle associée à l'acte moteur. Cette approche souligne donc le rôle essentiel des invariants dans la boucle perception-action, lesquels sont indissociables de l'activité naturelle du sujet (Paillard, 1991 ; O'Regan & Nöe, 2001).

C'est dans le respect de cette règle générale de préservation des contingences sensori-motrices que nous avons conçu notre système de coopération homme-machine. Lorsqu'il s'agit d'une interaction avec un dispositif technique non automatisé, l'émergence des

régularités dans la relation entre les actions motrices et les changements sensoriels qui en résultent apparaît naturellement et de manière relativement rapide. Ainsi, nous éprouvons peu de difficultés à interpréter les relations de cause à effet entre une rotation du volant de notre voiture vers la droite et un déplacement de celle-ci dans cette direction ou encore que, plus nous ouvrons le robinet d'eau chaude plus nous élevons la température du liquide. Cependant, par souci de confort ou pour répondre à des limitations humaines (d'ordre physique ou mental) un certain nombre d'automatisations peuvent s'imposer. Dans ces conditions, on ne se réduit plus au cas de figure d'une entité (la machine) exécutant de manière isomorphe la commande directe communiquée par la seule entité intelligente (l'homme), mais à une cohabitation, au sein d'un même système, entre deux intelligences, l'une répartie sur l'homme et l'autre sur la machine. Aussi, il n'est pas assuré qu'à chaque « output » moteur de l'opérateur, la machine réagisse de manière à renvoyer les « inputs » sensoriels attendus par l'individu, c'est-à-dire qu'il n'y ait pas de violation des lois de co-variation sensorimotrices que l'homme s'est construit au cours de son développement, telles que des discordances visuo-kinesthésiques (Pennel *et al.*, 2002).

La méthodologie expérimentale que nous proposons pour résoudre ce problème consiste à automatiser la machine de manière à ce que celle-ci ait une architecture, tant morphologique que fonctionnelle, la plus fidèle possible au modèle humain. En effet, on peut espérer que, si la machine offre à l'opérateur des référentiels spatiaux ou développe des comportements proches de ceux que l'homme possède lorsqu'il évolue directement dans son environnement, les contingences sensorimotrices auront plus de chance d'être préservées. Ainsi, cette démarche a été qualifiée d'« anthropomorphique ». Elle consiste à favoriser une appropriation du dispositif de téléopération en mettant en jeu une majorité de schèmes déjà préexistant dans les conditions naturelles. Il s'agit donc d'une appropriation à dominante assimilatrice. Pour tester la validité d'une telle approche nous avons configuré de manière différentielle le système, de façon à promouvoir dans un cas, une appropriation à dominante d'assimilation et dans l'autre cas, à dominante d'accommodation. Ce dernier cas a été obtenu en architecturant le dispositif de manière, cette fois-ci, « non anthropomorphique », c'est-à-dire tel que le sujet puisse transposer sur le robot le minimum de caractéristiques humaines (Poyet, 1993). Cette démarche expérimentale a tout d'abord été appliquée au niveau de l'architecture structurale puis de l'architecture structuro-fonctionnelle du système. Notre hypothèse de départ était que le téléopérateur devrait parvenir à l'appropriation sensori-motrice du système de téléopération, du moins lorsque celui-ci est configuré

anthropomorphiquement, une élévation de la performance générale dans cette condition devant constituer le marqueur de ce phénomène.

L'appropriation d'un outil semble s'accompagner d'une modification du schéma corporel de son utilisateur (Iriki *et al.*, 1996 ; Berti & Frassinetti, 2000). Aussi, notre première expérience a consisté à mettre en évidence une extension du schéma corporel de l'opérateur englobant le bras manipulateur robotique. Classiquement, l'espace environnant l'individu est divisé en trois secteurs : l'espace corporel (ou personnel), l'espace péricorporel (ou péripersonnel) et l'espace extracorporel (ou extrapersonnel). C'est seulement la délimitation entre espace péricorporel et extracorporel qui a intéressé cette première expérimentation. La démonstration que le bras manipulateur, situé physiquement dans l'espace extracorporel, parvient à intégrer l'espace péricorporel de l'opérateur a été réalisée par comparaison entre la précision dans la délimitation de l'espace de saisie de sujets avec leur propre bras, versus de sujets devant estimer les limites d'extension du bras robotique. L'absence de différence significative enregistrée quant à la précision de la délimitation de l'espace péricorporel entre l'entité « humain seul » et l'entité « humain + robot », nous a permis de conclure que ce résultat constituait bien un argument expérimental en faveur d'une intégration de la machine téléopérée dans le schéma corporel de l'opérateur.

Dans cette expérience, nous avons veillé à ce que l'architecture structurale de la relation récepteur visuel/organe effecteur suive une configuration de nature anthropomorphique. La question était alors maintenant de savoir si ce phénomène d'appropriation était encore présent lorsque cette relation ne respectait plus une architecture de type humain. Pour cela, trois conditions expérimentales correspondant à trois rapports topologiques caméra/bras érigés selon une échelle décroissante d'anthropomorphie ont été comparées entre-elles. La tendance générale obtenue est que plus la configuration s'éloigne d'une architecture anthropomorphique plus le niveau de précision dans la délimitation de l'espace péricorporel du robot diminue. Ainsi, ce défaut de précision finit par atteindre une valeur significativement différente de la référence humaine dans la configuration pour laquelle la relation caméra/bras est la plus déformée par rapport au modèle humain. Un tel résultat nous a donc permis de préciser que le caractère plus ou moins anthropomorphique de la configuration du dispositif de téléopération paraît une condition nécessaire pour parvenir à l'appropriation du système.

Si ces premières expériences permettent bien de montrer des signes évidents d'appropriation, celle-ci reste encore mise en évidence à un niveau relativement élevé, relevant davantage d'un ordre représentationnel que sensori-moteur. C'est pourquoi, la

dernière manipulation sur l'architecture structurale du robot a fait l'objet d'une analyse plus directement reliée au contrôle moteur du bras robotique téléopéré. Il s'agissait toujours de comparer les trois conditions de position relative de caméra par rapport au bras, mais en s'intéressant cette fois-ci à la performance motrice des opérateurs en fonction de ces conditions. Les résultats enregistrés sur cette analyse de l'action confirment ceux obtenus sur le plan de la perception. En effet, on retrouve cette tendance générale à la diminution de la performance motrice plus les configurations s'éloignent du modèle humain. De plus, il apparaît que le pattern d'exécution du mouvement se rapproche davantage de celui de l'homme lorsque le dispositif est configuré anthropomorphiquement. Ces observations au niveau de la cinématique du mouvement soutiennent un peu plus notre hypothèse d'une appropriation sensori-motrice d'une machine anthropomorphique, même lorsque celle-ci n'est pas en contact direct avec son utilisateur. Ainsi, au-delà de la continuité physique, c'est bien dans la corrélation entre le référentiel moteur et le changement sensoriel résultant, établie selon les règles de contingence développées au cours du vécu, que semble résider le facteur prépondérant pour parvenir à une appropriation de l'outil.

L'importance apparemment majeure de la préservation de l'intégrité de la boucle perception-action au niveau d'un dispositif d'assistance technique (Lenay *et al.*, 2001) va, donc, poser la question de l'impact de la qualité de l'implémentation d'un comportement d'inspiration humaine dans le fonctionnement de la machine, sur la dextérité du contrôle de l'opérateur. Pour cela, nous avons évalué l'influence de l'implémentation de mécanismes d'anticipation visuo-motrice de guidage du déplacement observés chez l'homme (Land & Lee, 1994 ; Grasso *et al.*, 1996 et 1998), sur le pilotage à distance du robot. A partir du modèle érigé par Land et Lee (1994), deux manières d'implémenter le réflexe d'anticipation visuelle de guidage du déplacement étaient envisageables. Soit l'opérateur pilotait directement la plate-forme et la caméra s'orientait automatiquement dans la direction du point tangent au bord intérieur de la trajectoire, c'est le mode de contrôle dit « plate-forme », soit selon le couplage inverse, c'est-à-dire où l'opérateur avait une commande directe de la caméra dont l'orientation était répercutée sur l'angle de navigation du robot de façon à suivre le modèle, c'est le contrôle « caméra ».

Les résultats expérimentaux convergent à montrer que lorsque le robot dispose d'une caméra mobile anticipant visuellement sur la navigation, l'opérateur semble beaucoup plus à l'aise que si l'engin n'est pas muni de ce réflexe. Ceci est vrai quelle que soit la manière dont cette implémentation a été effectuée. Ainsi, dans ces conditions de vision mobile, la tâche de pilotage est accomplie avec une plus grande rapidité. Le faible nombre d'occurrence

d'immobilisation du véhicule témoigne bien que cette vitesse accrue est liée à une meilleure capacité d'anticipation sur la trajectoire à venir, laquelle est appuyée par une augmentation du champ visuel fonctionnel. Ces données robotiques permettent donc de valider sur un plan applicatif les observations de Land et Horwood (1995) quant à la pertinence de diriger son regard au point de tangente de l'intérieur de la trajectoire. Cette étude avait mis en évidence que pour une telle direction du regard, les trajectoires du véhicule étaient beaucoup lissées, ce qui constitue un autre paramètre que notre étude confirme. Ces travaux révèlent aussi que la perception du point de tangente n'est pas suffisante pour pouvoir positionner correctement son véhicule. Une information visuelle intermittente sur les bords latéraux du mobile est en effet nécessaire afin d'effectuer une éventuelle correction de trajectoire pour recentrer l'engin sur le parcours (Donges, 1978 ; Godthelp, 1986). La non implémentation de ce feedback dans le mode de commande configuré selon le modèle « plate-forme » peut expliquer l'absence de différence significative avec le mode de contrôle réalisé à travers une caméra « fixe », quant au nombre de collisions produites contre les obstacles.

L'approximation dans la copie du comportement humain d'anticipation visuo-motrice paraît également se répercuter sur le pattern de contrôle du robot accompli par l'opérateur. Ce pattern a été analysé à l'aide de la relation biologique unissant la géométrie à la cinématique du mouvement, appelée « loi de puissance » (Lacquaniti *et al.*, 1983 ; Viviani & Schneider, 1991). Il apparaît que cette loi est nullement vérifiée en situation de téléopération, que l'opérateur ait à commander un robot avec caméra « fixe » ou avec une caméra « mobile » par contrôle direct des organes locomoteurs et mobilisation automatique du capteur visuel. Un tel résultat n'est pas du tout surprenant si on adhère à une théorie interprétant la « loi de puissance » comme la conséquence de facteurs biomécaniques périphériques (Gribble & Ostry, 1996 ; Wann *et al.*, 1988). En revanche, cette observation constituerait plutôt un argument expérimental en défaveur de la théorie centraliste de planification du mouvement (Massey *et al.*, 1992 ; Viviani & Schneider, 1991). A la décharge de cette dernière, on peut toujours objecter l'approximation du comportement implémenté par rapport au modèle humain. L'idée fut alors de veiller à une implémentation copiant bien plus fidèlement l'architecture spatio-temporelle du programme moteur d'exécution de l'anticipation visuo-motrice.

En effet, les mécanismes d'anticipation visuo-motrice de l'homme ne semblent pas architecturés selon une organisation du type « je regarde là où je vais », comme dans le modèle « plate-forme », mais plutôt du type « je vais là où je regarde » (Land & Lee, 1994 ; Grasso *et al.*, 1996). Cela signifie que c'est l'axe du regard qui détermine la direction du

déplacement et non l'inverse, telle que la tête, portant les yeux, soit utilisée comme une centrale inertielle de guidage stabilisée dans l'espace et à partir de laquelle les mouvements du corps sont coordonnés (Patla *et al.*, 1999). Cette distinction importante nous a inspiré un mode de couplage entre le capteur visuel et les organes locomoteurs du robot suivant un sens opposé au modèle « plate-forme », c'est-à-dire en respectant un programme moteur orienté depuis le haut jusqu'au bas du véhicule (caméra → robot). Ce modèle dit « caméra » a développé des performances systématiquement meilleures que la condition « fixe » et ce pour l'ensemble des paramètres analysés. En ce sens, il confirme l'intérêt d'implémenter des mécanismes d'inspiration humaine pour favoriser la Coopération Homme-Machine. Cependant, son analyse la plus intéressante est relativement au modèle « plate-forme ».

On remarque, par exemple, qu'au niveau de la performance brute (i.e. temps d'exécution du parcours) il n'y a pas réellement de différence entre ces deux types d'anticipation visuo-motrice. Il semble donc que le modèle « plate-forme » tend à être aussi efficace que le modèle « caméra ». En revanche, la fracture nette existant entre ces deux modes de contrôle apparaît au niveau du pattern d'exécution du mouvement. Que ce soit sur le plan du lissage des trajectoires ou sur celui de la relation vitesse/courbure, les résultats obtenus suggèrent que le contrôle du mouvement est effectué par deux processus différents entre ces deux modes. C'est en particulier en ce qui concerne la relation entre géométrie et cinématique du mouvement du robot que la distinction est la plus évidente. En effet, alors que le mode « plate-forme » (de même que le mode « fixe ») ne suit pas du tout la « loi de puissance », le mode « caméra », au contraire, amène l'opérateur à respecter la fameuse relation de racine cubique entre la vitesse tangentielle et le rayon de courbure. La reproduction de cette loi biologique à travers un dispositif dont la mécanique est fortement différente de celle de l'homme, tend à démontrer que l'opérateur commandant le télérobot équipé du modèle anthropomorphique « caméra » utilise des schèmes identiques à ceux du contrôle de ses propres mouvements. Cela témoigne donc d'une réelle intégration de la machine au niveau du bouclage sensori-moteur préexistant de l'individu et permet ainsi de déduire l'installation d'un phénomène d'appropriation par un processus à dominante d'assimilation, avec ce que cela suppose de gain dans le coût et la rapidité d'acquisition du nouveau système effecteur. A l'inverse, la similarité d'efficacité entre une anticipation « anthropomorphique » et une anticipation « non anthropomorphique », malgré un pattern de contrôle du mouvement très différent, suggère que l'opérateur placé dans cette dernière condition acquiert bien une certaine appropriation du système mais par la mise en jeu

majoritaire de schèmes nouvellement construits, c'est-à-dire par un processus à dominante d'accommodation.

Une telle recherche de l'appropriation de machines ou autres artefacts par l'individu, à travers une analyse fine de l'éventuelle reproduction de lois biologiques au sein de ce système hybride « homme-machine », est un champ d'investigation très profitable et prometteur pour ces deux domaines disciplinaires que sont la robotique et les neurosciences. En effet, la reproduction de lois humaines simples telles que la « loi de puissance », la « loi de Fitts » (Drapers *et al.*, 1999)..., constitue une méthodologie d'évaluation particulièrement pertinente pour concevoir des systèmes ergonomiquement adaptés mais aussi, en retour, être très informative sur les propriétés neurophysiologiques et neuropsychologiques de l'homme. Dans le cas présent, on remarque que c'est dans la condition expérimentale respectant la « loi de puissance » que l'implémentation de l'anticipation visuo-motrice offre la performance la plus systématiquement élevée. Ainsi, cette loi biologique va constituer un marqueur beaucoup plus sûr que de simples paramètres d'efficacité bruts pour indiquer à l'ingénieur ergonomiste la condition dans laquelle l'individu intègre le plus naturellement l'instrument qu'il manipule. De même, la reproductibilité de cette loi dans une situation de contrôle on ne peut plus idiosyncrasique que celle de téléopération est un résultat expérimental fort exploitable en neuroscience, afin d'apporter un éclairage nouveau sur l'opposition entre l'interprétation biomécanique périphérique et nerveuse centraliste de la relation vitesse/courbure. En ce qui concerne nos travaux, les données obtenues tendent davantage vers une explication de la « loi de puissance » comme relevant d'un modèle interne de l'être humain.

En définitive, cette étude pluridisciplinaire de thèse nous permet de tirer un certain nombre d'enseignements sur le plan ergonomique et neuroscientifique. Tout d'abord, nos travaux montrent que la tâche première de l'ergonome dans la conception d'une CHM est de rechercher la configuration assurant la plus grande unité entre l'homme et son outil. Cela signifie qu'à chaque action de l'opérateur, la machine doit réagir de manière à ce que la réponse soit logiquement et naturellement perçue par l'individu. C'est dans la régularité de la boucle perception-action que réside la synergie du couple homme-machine (Bach y Rita, 1982 ; Lenay *et al.*, 2001). Un moyen efficace de parvenir à cette appropriation de l'artefact par son utilisateur est l'approche anthropomorphique. Elle a l'avantage d'assurer une intégration sensori-motrice relativement rapide du fonctionnement de la machine, sans que l'opérateur n'ait à modifier totalement ses schèmes initiaux. Au niveau neuroscientifique, on comprend donc que si l'on parvient au bon couplage, l'outil manipulé peut s'avérer très profondément intégré au fonctionnement de l'utilisateur. Par exemple, la canne de l'aveugle

est un instrument de couplage qui rend accessible une perception tactile à l'extrémité de la canne, même si celle-ci n'est pas dotée de terminaison nerveuse. A partir du moment où l'outil est intégré dans un bouclage perceptivo-moteur, il devient transparent, c'est-à-dire qu'il disparaît du champ de la conscience pour accéder à celui des schèmes moteurs de l'individu. On pourrait également citer le cas du conducteur expérimenté qui finit par ne faire qu'un avec sa voiture, intégrant comme soit tout ce qui assure l'accomplissement de l'action. Enfin, il faut mentionner que cette collaboration de l'homme avec son outil ne sera pas sans effet retour sur son schéma corporel. Celui-ci ne se résumera plus à son enveloppe charnelle mais à une nouvelle entité ayant ses propres capacités motrices. On peut ainsi en déduire que c'est moins son contour physique que son potentiel d'action qui définit l'identité d'un individu.

Avant de conclure définitivement au sujet de l'appropriation d'un système de téléopération, il est néanmoins nécessaire d'émettre un certain nombre de bémols sur les moyens par lesquels un opérateur humain peut parvenir à cet état. Tout d'abord, même si nous avons mentionné que l'approche anthropomorphique semblait la démarche la plus pertinente dans les conditions expérimentales qui étaient les nôtres, il n'empêche qu'elle ne constitue pas un moyen unique ni systématique, tel qu'en témoigne le haut niveau d'efficacité obtenu en anticipation visuo-motrice implémentée selon un modèle non-anthropomorphique. De même, en ce qui concerne les autres conditions d'architecture fonctionnelle ou structurale configurées non-anthropomorphiquement, on peut objecter qu'elle ne nous ont pas permis d'atteindre un degré élevé d'appropriation à cause de l'échelle réduite de temps sur laquelle les expériences ont été menées. En effet, selon nos hypothèses la configuration anthropomorphique favoriserait la mise en jeu d'une majorité de schèmes préexistants, alors qu'en non-anthropomorphe davantage de schèmes nouveaux doivent être construits ce qui impliquerait un temps d'adaptation plus important.

Autrement dit, ces considérations laissent suggérer que, si l'approche anthropomorphique est une démarche expérimentale qui vient de faire ses preuves dans la conception d'un dispositif de téléopération ergonomiquement adapté à l'homme, il est tout à fait possible d'envisager d'autres modes de couplage homme-machine qui puissent ménager une telle adaptation. Néanmoins, ce qui semble essentiel dans tous les cas, est que le système soit conçu de manière à préserver les contingences sensori-motrices inhérentes à la nature humaine, ceci dans le but de se prémunir contre les problèmes de temps et difficultés d'apprentissage, facteurs pouvant s'avérer rédhibitoires à l'appropriation d'un artefact. Dans le cas de notre système de téléopération à visé d'assistance aux personnes handicapées, la majeure partie du travail reste à réaliser au niveau de l'aménagement d'une interface de

commande qui soit la plus universellement adaptée à l'ensemble des handicaps moteurs existants. A cette fin, deux principaux moyens de contrôle ont attiré notre attention pour les travaux à venir. Le premier concerne la commande oculaire. Il s'agirait, ici, d'inférer la direction du déplacement du robot en fonction de l'axe du regard de l'opérateur. Le fait de fournir à l'œil un pouvoir plus naturellement dévolu aux membres pelviens ou thoraciques peut apparaître en première approche comme relativement incongru. Cependant, l'expérience montre que la majorité de nos actes moteurs sont systématiquement exécutés sous le contrôle de l'organe visuel (Land *et al.*, 1999). Aussi, la préservation de cette invariance sensori-motrice pourrait parfaitement contribuer à rendre viable ce type d'interfaçage. Enfin, le second moyen consisterait à contrôler la machine par mesure directe de l'activité cérébrale de l'individu. Dans cette condition, l'opérateur serait équipé d'un scalp enregistrant ses émissions électro-encéphalographiques pour en extraire un signal exploitable pour commander le robot. Au-delà des contraintes techniques, ce genre d'interfaçage pose la question des capacités humaines à produire une activité cérébrale constante pour assurer un mouvement donné de la machine (Curran & Stokes, 2003). Ainsi, cela laisse présager d'un effort d'apprentissage par biofeedback pouvant s'avérer plus ou moins long en fonction des différences interindividuelles. Néanmoins, une fois cette étape franchie, on ne pourrait imaginer de couplage homme-machine plus incarné, que par ce contrôle direct de la matière par l'esprit.

# Bibliographie

- Abend, W., Bizzi, E., & Morasso, P. (1982). Human arm trajectory formation. *Brain*, *105*, 331-348.
- Aglioti, S., DeSouza, J.F.X., & Goodale, M.A. (1995). Size-contrast illusion deceive the eye but not the hand. *Current Biology*, *5*, 679-685.
- Aglioti, S., Smania, N., Manfredi, M., & Berlucchi, G. (1996). Disownership of left hand and of objects related to it in a patient with right brain damage. *Neuroreport*, *8*, 293-296.
- Andersen, R.A. (1995). Encoding of intention and spatial location in the posterior parietal cortex. *Cerebral Cortex*, *5*, 457-469.
- Bach y Rita, P. (1982). Sensory substitution in rehabilitation. In L. Illis, M. Sedgwick & H. Granville (Eds), *Rehabilitation of the Neurological Patient*. Oxford : Blackwell.
- Bach y Rita, P. (1972). *Brain mechanisms in sensory substitution*. New-York : Academic Press.
- Bailey, B. (1996). Drones in southeast Asia. *55<sup>th</sup> Strategic Reconnaissance Wing Association*. Navarre, USA.
- Bainbridge, L. (1987). Irones of automation. In J. Rasmussen, K.D. Duncan & J. Leplat (Eds), *New Technology and Human Factor*. Chichester : Wiley, 271-284.
- Berthoz, A. (1997). *Le Sens du Mouvement*. Paris : Odile Jacob.
- Berti, A., & Frassinetti, F. (2000). When far becomes near : remapping of space by tool use. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*, 415-420.
- Bholat, O.S., Haluck, R.S., Kutz, R.H., Gorman, P.J., & Krummel, T.M. (1999). Defining the role of haptic feedback in minimally invasive surgery. *Study in Health and Technology Information*, *62*, 62-66.
- Biederman, C. (1948). *Art as the Evolution of Visual Knowledge*. Red Wing, Minnesota : Charles Biederman.
- 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.

- Billings, C.E. (1991). *Human-Centered Aircraft Automation : A Concept and Guidelines*. Technical Memorandum n° 103885. Moffett Field : NASA Ames Research Center.
- Bingham, G.P., & Pagano, C.C. (1998). The necessity of a perception-action approach to definite distance perception : monocular distance perception to guide reaching. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24, 145-168.
- Biocca, F. (1997). The Cyborg's dilemma : progressive embodiment in virtual environments. In *Proceedings Second International Conference on Cognitive Technology*. Aizu, Japan, August.
- Biocca, F.A., & Rolland, J.P. (1998). Virtual eyes can rearrange your body : adaptation to visual displacement in see-through, head-mounted displays. *Presence*, 7, 262-277.
- Bisiach, E. (1997). The spatial features of unilateral neglect. In P. Thier & H.O. Karnath (Eds), *Parietal Lobe Contribution to Orientation in 3D Space*. Berlin : Springer.
- Blackmon, T., Nguyen, L., Neveu, C., & Rasmussen, D. (1999). Virtual reality mapping system for Chernobyl accident site assessment. In *Proceedings of SPIE*. Cambridge, USA.
- Bonnet, C. (1986). *Manuel pratique de psychophysique*. Paris : A. Colin.
- Bootsma, R.J., Marteniuk, R.G., MacKenzie, C.L., & Zaal, F.T. (1994). The speed-accuracy trade-off in manual prehension : effect of movement amplitude, object size and object width on kinematic characteristics. *Experimental Brain Research*, 98, 535-541.
- Bruce, C.J., & Golberg, M.E. (1985). Primate frontal eye fields. Single neurons discharging before saccades. *Journal of Neurophysiology*, 53, 603-635.
- Bullinger, A. (1987). Space, organism and objects, a Piagetian approach. In P. Ellen & C. Thinus-Blanc (Eds), *Cognitive processes and spatial orientation in animal and man*, Dordrecht : Martinus Nijhoff Publishers.
- Carrier, D. (1992). Soviet rover systems. In *Proceedings of the AIAA Space Programs and Technologies Conference*. Huntsville, USA.
- Chieffi, S., & Gentilucci, M. (1993). Coordination between the transport and the grasp component during prehension movements. *Experimental Brain Research*, 94, 471-477.
- 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.
- Coello, Y., & Magne, P. (2000). Determination of target position in a structured environment : selection of information for action. *European Journal of Cognition Psychology*, 12, 489-519.
- Cohen, R., Baldwin, L.M., & Sherman, R.C. (1978). Cognitive maps of a naturalistic setting. *Child Development*, 49, 1216-1218.

- Cohen, R., & Weatherford, D.L. (1980). Effects of route travelled on the distance estimates of children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 29, 403-412.
- Colby, C.L., & Duhamel, J.R. (1991). Heterogeneity of extrastriate visual areas and multiple parietal areas in the macaque monkey. *Neuropsychologia*, 29, 517-537.
- Colby, C.L., & Duhamel, J.R., (1996). Spatial representations for action in parietal cortex. *Cognitive Brain Research*, 5, 105-115.
- Cornilleau-Péres, 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.
- Cowey, A., Small, M., & Ellis, S. (1994). Left visuo-spatial neglect can be worse in far than in near space. *Neuropsychologia*, 32, 1059-1066.
- Cowey, A., Small, M., & Ellis, S. (1999). No abrupt change in visual hemineglect from near to far space. *Neuropsychologia*, 37, 1-6.
- Crannell, C.W., & Peters, G. (1970). Monocular and binocular estimations of distance when knowledge of the relevant space is absent. *Journal of Psychology*, 76, 157-167.
- Curran, E.A., & Stokes, M.J. (2003). Learning to control brain activity : a review of the production and control of EEG components for driving brain-computer interface (BCI) systems. *Brain and Cognition*, 51, 326-336.
- Cutting, J.E. (1997). How the eye measures reality and virtual reality. *Behavior Research Methods, Instrumentation and Computers*, 29, 29-36.
- Cutting, J.E., & Vishton, P.M. (1995). Perceiving layout and knowing distances : the integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In W. Epstein & S. Rogers (Eds), *Handbook of Perception and Cognition : Perception of Space and Motion*. San Diego, CA : Academic Press.
- Debernard, S. (1995). Coopération home-machine dans le contrôle aérien. *Journées « Supervision et Coopération Homme-Machine » du GDR Automatique du CNRS*. Paris, France, Janvier.
- Desmurget, M., Pelisson, D., Rossetti, Y., & Prablanc, C. (1998). From eye to hand : planning goal-directed movements. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 22, 761-788.
- Di Pellegrino, G., Làdavas, E., & Farnè, A. (1997) Seeing where your hands are. *Nature*, 338, 730.
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors*, 20, 691-707.
- Drapers, J.V., Jared, B.C., & Noakes, M.W. (1999). American Nuclear Society 8<sup>th</sup> Topical Meeting on Robotics and Remote Systems. Pittsburgh, USA : April.

- Driver, J., Mattingley, J.B., Rorden, C., & Davis, G. (1997). Extinction as a paradigm measure of attentional bias and restricted capacity following brain injury. In P. Thier & H.O. Karnath (Eds), *Parietal Lobe Contribution to Orientation in 3D Space*. Heidelberg : Springer.
- Driver, J., & Spence, C. (1998). Attention and the crossmodal construction of space. *Trends in Cognitive Science*, 2, 254-262.
- Duhamel, J.R., Bremmer, F., BenHamed, S., & Graf, W. (1997). Spatial invariance of visual receptive fields in parietal cortex neurons. *Nature*, 389, 845-848.
- Dunn, B.E., Gray, G.C., & Thompson, D. (1965). Relative height on the picture-plane and depth perception. *Perceptual and Motor Skills*, 21, 227-236.
- 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.
- Farnè, A., & Làdavas, E. (2000). Dynamic size-change of hand peripersonal space following tool use. *Neuroreport*, 11, 1645-1649.
- Farnè, A., Zeloni, G., & Làdavas, E. (1999). Visual peripersonal space centered on the face in humans. *Cortex*, 35, 130.
- Ferrel, C., Orliaguet, J.P., Leifflén, D., Bard, C., & Fleury, M. (2001). Visual context and the control of movements through video display. *Human Factors*, 43, 56-65.
- Ferris, S.H. (1972). Motion parallax and absolute distance. *Journal of Experimental Psychology*, 95, 258-263.
- Fincham, E.F., & Walton, J. (1957). The reciprocal actions of accommodation and convergence. *Journal of Physiology*, 137, 488-508.
- Fitch, H., & Turvey, M.T. (1978). On the control of activity : some remarks from an ecological point of view. In D. Landers & R. Christina (Eds), *Psychology of motor behavior and sport*. Urbana, IL : Human Kinetics Pub.
- Fitts, P.M. (1951). *Human Engineering for an Effective Air Navigation and Traffic Control System*. Washington D.C. : National Research Council.
- Fogassi, L., Gallese, V., Fadiga, L., Luppino, G., Matelli, M., & Rizzolatti, G. (1996). Coding of peripersonal space in inferior premotor cortex (area F4). *Journal of Neurophysiology*, 76, 141-157.
- Fong, T., & Thorpe, C. (2001). Vehicle teleoperation interface. *Autonomous Robots*, 11, 9-18.
- Gage, D. (1996). UGV history 101 : A brief history of Unmanned Ground Vehicle (UGV) development efforts. *Unmanned Systems Magazine*, 13, 9-16.

- Gaillard, J.P. (1993). Analyse fonctionnelle de la boucle de commande en télémanipulation. In A. Weill-Fassina, P. Rabardel & D. Dubois (Eds), *Représentations pour l'Action*. Toulouse : Octares.
- Gaillard, J.P. (1997). *Psychologie de l'Homme au Travail. Les Relations Homme-Machine*. Paris : Dunod.
- Gaillard, J.P., & Terré, C. (1989). Ergonomie et téléopération. *Actes du 25<sup>e</sup> Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française (SELF)*. Lyon, France.
- Gallese, V., Murata, A., Kaseda, M., Niki, N., & Sakata, H. (1994). Deficit of hand preshaping after muscimol injection in monkey parietal cortex. *Neuroreport*, 5, 1525-1529.
- Galletti, C., Battaglini, P.P., & Fattori, P. (1993). Parietal neurons encoding spatial locations in craniotopic coordinates. *Experimental Brain Research*, 96, 221-229.
- Gentilucci, M., Castiello, U., Corradini, M.L., Scarpa, M., Ulmità, C., & Rizzolatti, G. (1991). Influence of different types of grasping on the transport component of prehension movements. *Neuropsychologia*, 29, 361-378.
- Gentilucci, M., & Rizzolatti, G. (1990). Cortical motor control arm and hand movements. In M.A. Goodale (Ed.), *Vision and Action : the Control of Grasping*. Norwood, NJ : Ablex.
- Gibson, J.J. (1950). *Perception of the visual world*. Boston : Houghton Mifflin.
- Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston : Houghton Mifflin.
- Godthelp, J. (1986). Vehicle control during curve driving. *Human Factors*, 28, 211-221.
- 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.
- Graves, A. (1997). Enhancement of a direct control teleoperator system. *Working Paper 1 of the Centre for Computational Intelligence*. Leicester, UK.
- Gray, S.V., & Wilson, J.R. (1988). User safety requirements for robot safety, a task analysis approach. *10<sup>th</sup> Ergonomics International Association Symposium*. 1-5 August, Sydney.
- Graziano, M.S.A., & Gross, C.G. (1995). The representation of extrapersonal space : a possible role for bimodal, visual-tactile neurons. In M.S. Gazzaniga (Ed.), *The Cognitive Neurosciences*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Graziano, M.S.A., Hu, X.T., & Gross, C.G. (1997). Visuospatial properties of the ventral premotor cortex. *Journal of Neurophysiology*, 77, 2268-2292.

- Gribble, P.L., & Ostry, D.J. (1996). Origins of the power law relation between movement velocity and curvature : modeling the effects of muscle mechanics and limb dynamics. *Journal of Neurophysiology*, 76, 2853-2860.
- 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*. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, INC, Publishers, 223-231.
- Guittet, J. (1988). *La Robotique Médicale*. Paris : Hermès.
- Haffenden, A., & Goodale, M.A. (1998). The effect of pictorial illusion on prehension and perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10, 122-136.
- 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.
- Hainsworth, D. (1993). Mine emergency survey vehicle : Numbat. In *Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference of Safety in Mines Research Institutes*. Pretoria, South Africa
- Hall, E.T. (1966). *The Hidden Dimension*. New-York : Doubleday.
- Halligan, P.W., & Marshall, J.C. (1991). Left neglect for near but not for far space in man. *Nature*, 350, 498-500.
- Halligan, P.W., & Marshall, J.C. (1994). Spatial neglect : position papers on theory and practice. *Neuropsychological Rehabilitation*, 4, special issue.
- Hallion, R. (1984). *On the Frontier*. Washington D.C. : NASA SP-4303.
- Hanneton, S., Gapenne, O., Genouel, C., Lenay, C., & Marque, C. (1999). Dynamics of shape recognition through a minimal visuo-tactile sensory substitution interface. *Third International Conference on Cognition and Neural Systems*. Boston, USA : May.
- Heilman, K.M., Watson, R.T., Valenstein, E., & Damasio, A.R. (1983). Localization of lesion in neglect. In A. Kertesz, *Localization in Neuropsychology*. New-York : Academic Press.
- 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.
- Helmholtz, H. (1867). *Physiological optics*. Menasha, WI : The Optical Society of America.
- 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)*.
- Hoc, J.M. (2000). From human-machine interaction to human-machine cooperation. *Ergonomics*, 43, 833-843.

- Hollnagel, E., & Woods, D.D. (1983). Cognitive systems engineering : new wine in new bottles. *International Journal of Man-Machine Studies*, 18, 583-600.
- Hoppenot, P., & Colle, E. (2001). Localization and control of a rehabilitation mobile robot by close human-machine cooperation. *IEEE Transaction on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 9, 181-190.
- Husain, M., & Kennard, C. (1996). Visual neglect associated with frontal lobe infarction. *Journal of Neurology*, 243, 652-657.
- Hyvarinen, J., & Poranen, A. (1974). Function of the parietal associative area 7 as revealed from cellular discharges in alert monkeys. *Brain*, 97, 673-692.
- Ijsselsteijn, W. (2002). Elements of a multi-level theory of presence : phenomenology, mental processing and neural correlates. In *Proceedings of Presence*. Porto, Portugal, October.
- Ijsselsteijn, W., A., De Ridder, H., Freeman, J., & Avons, S.E. (2000). Presence : Concept, determinants and measurement. In *Proceedings of the SPIE, Human Vision and Electronic Imaging*. San Jose, USA, January.
- Iriki, A., Tanaka, M., & Iwamura, Y. (1996). Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons. *Neuroreport*, 7, 2325-2330.
- Iriki, A., Tanaka, M., Obayashi, S., & Iwamura, Y. (2001). Self-images in the video monitor coded by monkeys intraparietal neurons. *Neuroscience Research*, 40, 163-173.
- Jakobson, L.S., & Goodale, M.A. (1991). Factors affecting higher-order movement planning : a kinematic analysis of human prehension. *Experimental Brain Research*, 86, 199-208.
- Jeannerod, M. (1987). *Neurophysiological and Neuropsychological Aspect of Spatial Neglect*. Amsterdam : North Holland.
- Jeannerod, M. (1997). *The Cognitive Neuroscience of Action*. Cambridge, MA : Blackwell.
- Jeannerod, M. (1988). *The Neural and Behavioural Organization of the Goal Directed Movements*. Oxford : Oxford University Press.
- Jeannerod, M. (1984). The timing of natural prehension movements. *Journal of Motor Behavior*, 16, 235-254.
- Johansson, G. (1973). Monocular movement parallax and near space perception. *Perception*, 2, 136-145.
- Johansson, G., & Börjesson, E. (1989). Toward a new theory of vision studies in wide-angle space perception. *Ecological Psychology*, 1, 301-331.
- Jones, C. (1997). Unmanned aerial vehicles (UAVS). An assessment of historical operations and future possibilities. *Air Command and Staff College*.

- Karsenty, L., & Brézillon, P. (1995). Coopération homme-machine et explication. *Le Travail Humain*, 58, 289-310.
- Kay, J. (1997). *STRIPE : Remote driving using limited image data*. Ph.D. Thesis CMU-CS-97-100, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA.
- Kersten, D., & Legge, G. (1983). Convergence accommodation. *Journal of the Optical Society of America*, 73, 322-388.
- Konczack, J., Borutta, M., & Dichgans, J. (1997). The development of goal-directed reaching in infants : learning to produce task-adequate patterns of joint torque. *Experimental Brain Research*, 113, 465-474.
- Kosslyn, S.M., Pick, H., & Fariello, G.R. (1974). Cognitive maps in children and men. *Child Development*, 45, 707-716.
- Laborde, C., & Mejias, B. (1985). The construction process of an interaction by middle-school pupils : an experimental approach. In *Proceedings of the Ninth International Conference PME*. Utrecht, Netherlands.
- Lacquaniti, F., Maioli, C. (1987). Anticipatory and reflex coactivation of antagonist muscles in catching. *Brain Research*, 406, 373-378.
- Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54, 115-130.
- Làdavas, E., Di Pellegrino, G., Farnè, A., & Zeloni, G. (1998). Neuropsychological evidence of an integrated visuotactile representation of peripersonal space in humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10, 581-589.
- Land, M.F. (1998). The visual control of steering. In L.R. Harris & K. Jenkin (Eds). *Vision and Action*, 163-180. Cambridge University Press.
- Land, M.F., & Horwood, J. (1995). Which parts of the road guide steering. *Nature*, 377, 339-340.
- Land, M.F., Lee, D.N. (1994). Where we look when we steer ? *Nature*, 369, 742-744.
- 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.
- Landy, M.S, Maloney, L.T., Johnston, E.B., & Young, M.J. (1995). Measurement and modelling of the depth cue combination. *Vision Research*, 35, 389-412.
- Landy, M.S, Maloney, L.T., & Young, M.J. (1991). Psychophysical estimation of the human depth combination rule. In P.S. Shenker (Ed.), *Sensor Fusion III : 3D Perception and Recognition, Proceedings of the SPIE*, 1383, 247-254.

- Ledebt, A. (2001). L'interdépendance de la perception et de l'action dans le développement de la motricité du jeune enfant. In Y. Coello & J. Honoré (Eds), *Percevoir, s'Orienter et Agir dans l'Espace : Approche Pluridisciplinaire des Relations Perception-Action*. Marseille : Solal.
- 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.
- Lenay, C., Cannu, S., & Villon, P., (1997). Technology and perception : the contribution of sensory substitution systems. *Second International Conference on Cognitive Technology*. Aizu, Japan.
- Lenay, C., Gapenne, O., & Stewart, J. (2001). The constitution of spatiality in relation to the lived body : a study based on prosthetic perception. *Conference on the Emergence and Development of Embodied Cognition*. Beijing, China : August.
- Lenay, C., Hanneton, S., & Gapenne, O. (2000). Virtual space and perception substitution. In *Proceedings of the 4<sup>th</sup> World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI), Vol. III*. Orlando, USA.
- Léonard, F., & Rabardel, P. (1984). Objets matériels fabriqués et développement cognitif. In *Programme Scientifique Présenté à l'Appui d'une Demande de Création de RCP (INRP)*. Paris.
- Leplat, J. (1985). *Erreur Humaine, Fiabilité Humaine dans le Travail*. Paris : A. Colin.
- Loomis, J.M. (1992). Distal attribution and presence. *Presence*, 1, 113-118.
- 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., Hannaford, 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.
- Magenes, G., Vercher, J.L., & Gauthier, G.M. (1992). Hand movement strategies in telecontrolled motion along 2D trajectories. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 22, 242-257.
- Maravita, A., Husain, M., Clarke, K., & Driver, J. (2001). Reaching with a tool extends visual-tactile interactions into far space : evidence from cross-modal extinction. *Neuropsychologia*, 39, 580-585.

- Maravita, A., Spence, C., Clarke, K., Husain, M., & Driver, J. (2000). Vision and touch through the looking glass in a case of crossmodal extinction. *Neuroreport*, *169*, 3521-3526.
- Marescaux, J., Leroy, J., & Gagner, M. (2001). Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature*, *413*, 379-380.
- Marteniuk, R.G., Leavitt, J.L., MacKenzie, C.L., & Athenes, S. (1990). Functional relationship between grasp and transport components in a prehension task. *Human Movement Science*, *9*, 149-176.
- Massey, J.T., Lurito, J.T., Pellizzer, G., & Georgopoulos, A.P. (1992). Three-dimensional drawings in isometric conditions : relation between geometry and kinematics. *Experimental Brain Research*, *88*, 685-690.
- Massimo, M., & Sheridan, T. (1989). Variable force and visual feedback effects and teleoperator man/machine performance. *Nasa Conference on Space Telerobotics*. Pasadena.
- Matelli, M., Camarda, R., Glickstein, M., & Rizzolatti, G. (1986). Afferent and efferent projections of the inferior area 6 in the macaque monkey. *The Journal of Comparative Neurology*, *251*, 281-298.
- Mattingley, J.B., Driver, J., Beschin, N., & Robertson, I.H. (1997). Attentional competition between modalities : extinction between touch and vision after right hemisphere damage. *Neuropsychologia*, *35*, 867-880.
- McGovern, D. (1990). Experiences and results in teleoperation of land vehicles. *Technical Report SAND 90-0299 of the Sandia National Laboratories*. Albuquerque, USA.
- Mendelsohn, P. (1986). La transposition de schèmes familiaux dans un langage de programmation chez l'enfant. In C. Bonnet, J.M. Hoc & G. Tiberghien (Eds), *Psychologie, Intelligence Artificielle et Automatique*. Bruxelles : Mardaga.
- 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*.
- Meyer, P., & Biocca, F. (1992). The elastic body image : an experiment on the effect of advertising and programming on body image distortions in young women. *Journal of Communication*, *42*, 108-133.

- Meyer, D.E., Abrams, D.A., Kornblum, S., Wright, C.E., & Smith, J.E.K. (1988). Optimality in human motor performance : ideal control of rapid aimed movements. *Psychological Review*, 95, 340-370.
- 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*.
- Millot, P. (1988). *Supervision des Procédés Automatisés et Ergonomie*. Paris : Hermès.
- Minsky, M. (1980). Telepresence. *Omni*, 2, 44-52.
- Montangeron, J., & Maurice-Naville, D. (1994). *Piaget ou l'Intelligence en Marche*. Liège : Mardaga.
- Morasso, P. (1981). Spatial control arm movements. *Experimental Brain Research*, 42, 223-227.
- Morgan, M.W. (1968). Accommodation and convergence. *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry*, 45, 417-454.
- Morrison, J.D., & Whiteside, T.C. (1984). Binocular cues in the perception of distance of a point source of light. *Perception*, 13, 555-566.
- Mountcastle, V.B., Lynch, J.C., Georgopoulos, A., Sakata, H., & Acuna, C. (1975). Posterior parietal association cortex of the monkey. *Journal of Neurophysiology*, 38, 871-908.
- Murray, D.M., Reid, I.D., & Davidson, A.J. (1997). Steering without representation with the use of active fixation. *Perception*, 26, 1519-1528.
- Newell, K.M., & Scully, D.M. (1987). *The Development of Prehension : Constraints on Grip Patterns*. Unpublished manuscript. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Older, M.T., Waterson, P.E., & Clegg, C.W. (1997). A critical assessment of task allocation methods and their applicability. *Ergonomics*, 40, 151-171.
- Ooi, T.L., Wu, B., & He, Z.J. (2001). Distance determined by the angular declination below the horizon. *Nature*, 414, 155-156.
- O'Regan, K. & Nöe, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 5.
- Orliaguet, J.P., & Coello, Y. (1998). Geste d'homme, gestes 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.

- Pagano, C.C., & Bingham, G.P. (1998). Comparing measures of monocular distance perception : verbal and reaching errors are not correlated. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24, 1037-1051.
- Paillard, J. (1991). *Brain and Sapce*. Oxford : Oxford University Press.
- Paillard, J. (1993). The hand and the tool : the functional architecture of human technical skills. In A. Berthelet & J. Chavaillon (Eds), *The Use of Tools by Human and Non-Human Primates*. New-York : Oxford University Press.
- Parasuraman, R. (2000). Designing automation for human use : empirical studies and quantitative models. *Ergonomics*, 43, 931-951.
- 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.
- Parasuraman, R., & Mouloua, M. (1996). *Automation and Human Performance : Theories and Applications*. Mahwah : Lawrence Erlbaum.
- Patla, A.E., Adkin, A., & Ballard, T. (1999). Online steering : coordination and control of body center of mass, head and body reorientation. *Experimental Brain Research*, 129, 629-634.
- 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.
- Pennel, I., Coello, Y., & Orliaguet, JP. (2002). Frame of reference and adaptation to directional bias in a video-controlled reaching task. *Ergonomics*, 45, 1047-1077.
- Pennel, I., Coello, Y., & Orliaguet, JP. (2003). Visuokinesthetic realignment in a video-controlled reaching task. *Journal of Motor Behavior*, 35, 274-284.
- Pennel, I., Ferrel, C., Coello, Y., & Orliaguet, J.P. (2002). Contrôle sensori-moteur en situation de téléopération : données théoriques et perceptives ergonomiques. *Le Travail Humain*, 65, 29-58.
- Perenin, M.T. (1997). Optic ataxia and unilateral neglect : clinical evidence for dissociable spatial functions in posterior parietal cortex. In P. Thier & H.O. Karnath (Eds), *Parietal Contributions to Orientation in 3D Space*. Heidelberg : Springer.
- 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.

- Péruch, P., Vercher, J.L & Gauthier G.M. (1996). Active and passive visual information in remote-controlled vehicles. In A.G. Gale, I.D. Brown, C.M. Haslegrave, H.W. Kruysse, & S.P. Taylor (Eds), *Vision in Vehicles V*, 211-216. Elsevier Science B.V.
- Pew, R.W. (1974). Human perceptual-motor performance. In B. Kantowitz (Ed.), *Human Information Processing*. Hillsdale : H.J. Erlbaum.
- Piaget, J. (1967). *Biologie et Connaissance. Essai sur les Relations entre les Régulations Organiques et les Processus Cognitifs*. Paris : Gallimard.
- Piaget, J., & Beth, E.W. (1961). Epistémologie mathématique et psychologie. Essai sur les relations entre la logique formelle et la pensée réelles. In *Etudes d'Epistémologie Génétique n° 14*. Paris : PUF.
- Piaget, J. (1936). *La Naissance de l'Intelligence chez l'Enfant*. Paris, Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- Piaget, J. (1967). *La Psychologie de l'Intelligence*. Paris : A. Colin.
- Piaget, J. (1974). *Réussir et Comprendre*. Paris : PUF.
- 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.
- Proffitt, D.R., Stefanucci, J., Banton, T., & Epstein, W. (2003). The role of effort in perceiving distance. *Psychological Science*, 14, 106-112.
- Poyet, C. (1993). Les modes de dialogue homme/robot : aides ou obstacles aux représentations du mouvement. In A. Weill-Fassina, P. Rabardel & D. Dubois (Eds), *Représentations pour l'Action*. Toulouse : Octares.
- Poyet, C. (1989). L'homme agent de fiabilité dans les systèmes automatisés. In J. Leplat & G. De Terssac (Eds), *Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes*. Toulouse : Octares.
- Pufall, P.B., & Dunbar, C. (1992). Perceiving whether or not the world affords stepping onto and over : a developmental study. *Ecological Psychology*, 4, 17-38.
- Rabardel, P. (1991). Activity with a training robot and formation of knowledge. *Journal of Artificial Intelligence in Education*. USA.
- Rabardel, P. (1990). Analyse de l'activité cognitive et modélisation des situations pour l'évaluation et la conception de robots pédagogiques. *Actes du 1<sup>er</sup> Congrès Francophone de Robotique Pédagogique*, 45-60.
- Rabardel, P. (1995). *Les Hommes et les Technologies. Approche Cognitive des Instruments Contemporains*. Paris : A. Colin.

- Rabardel, P. (1993a). Microgenèse et fonctionnalité des représentations dans une activité avec un instrument. In A. Weill-Fassina, P. Rabardel & D. Dubois (Eds), *Représentations pour l'Action*. Toulouse : Octares.
- Rabardel, P. (1993b). Représentation dans des situations d'Activités Instrumentées. In A. Weill-Fassina, P. Rabardel & D. Dubois (Eds), *Représentation pour l'Action*. Toulouse : Octares.
- Rafal, R.D. (1994). Neglect. *Current Opinion in Neurobiology*, 4, 231-236.
- Rasmussen, J. (1986). *Information Processing and Human-Machine Interaction : an Approach to Cognitive Engineering*. New-York : Elsevier.
- Rasmussen, J., Pejtersen, A.M., & Goodstein, L.P. (1994). *Cognitive Systems Engineering*. New-York : Wiley.
- Raviv, D. & Herman M. (1993). Visual servoing from 2-D image cues. In Y. Aloimonos (Ed.), *Active Perception*. Erlbaum, Hillsdale, NJ. 191-226.
- Reinhardt-Rutland, A.H. (1996). Remote operation : a selective review of research into visual depth perception. *The Journal of General Psychology*, 123, 237-248.
- Rizzolatti, G., Camarda, R., Fogassi, L., Gentilucci, M., Luppino, G., & Matelli, M. (1988). Functional organization of area 6 in the macaque monkey. Area F5 and the control of distal movements. *Experimental Brain Research*, 71, 491-507.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Fogassi, L., & Gallese, V. (1997). The space around us. *Science*, 277, 190-191.
- Rizzolatti, G., Matelli, M., & Pavesi, G. (1983). Deficits in attention and movement following the removal of postarcuate (area 6) and prearcuate (area 8) cortex in macaque monkeys. *Brain*, 106, 655-673.
- Robertson, I.H., & Marshall, J.C. (1993). *Unilateral Neglect : Clinical and Experimental Studies*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Roger, B.J. & Graham, M. (1979). Motion parallax as an independent cue for depth. *Perception*, 8, 125-134.
- 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 Transaction on Biomedical Engineering*, 14, 375-381.
- Rybarczyk, Y., Mestre, D.M., Hoppenot, P., & Colle, E. (2004). Implémentation de mécanismes d'anticipation visuo-motrice en téléopération. *Le Travail Humain (à paraître)*.

- Sakata, H., Taira, M., Mine, S., & Murata, A. (1992). Hand-movement-related neurons of the posterior parietal cortex of the monkey : their role in the visual guidance of hand movements. In R. Caminiti, P.B. Johnson & Y. Burnod (Eds). *Control of Arm Movement in Space*. Heidelberg : Springer.
- Sakata, H., Taira, M., Murata, A., & Mine, S. (1995). Neural mechanisms of visual guidance of hand action in the parietal cortex of the monkey. *Cerebral Cortex*, 5, 429-438.
- Schmidt, R.A. (1975). Scheme theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225-260.
- Schurr, M.O., Buess, G.F., Neisius, B., & Voges, U. (2000). Robotics and telemanipulation technologies surgery. A review of the ARTEMIS project (Advanced Robotic Telemanipulation for Minimally Invasive Surgery). *Surgery Endoscopic*, 14, 375-381.
- Servos, P., Goodale, M.A., & Jakobson, L.S. (1992). The role of binocular vision in prehension : a kinematic analysis. *Vision Research*, 32, 1513-1521.
- Sheridan, T.B. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1, 120-125.
- Siegel, A.W., & White, S.H. (1975). The development of spatial representation of large-scale environments. In H.M. Reese (Ed.). *Advances in Child Development and Behaviour*. New-York : Academic Press.
- Slater, M., & Usoh, M. (1993). Representations systems, perceptual position, and presence in immersive virtual environments. *Presence*, 2, 221-233.
- 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.
- Soechting, J.F., Lacquaniti, F., & Terzuolo, C.A. (1986). Coordination of arm-movements in three-dimensional space. Sensorimotor mapping during drawing movement. *Neuroscience*, 2, 295-311.
- Sommer, R. (1969). *Personal Space*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall.
- Stassen, H.G., Dankelman, J., & Grimbergen, C.A. (1998). Developments in minimally invasive surgery and interventional techniques. In *Proceedings of the 16<sup>th</sup> EAC on HDM and MC*. Kassel, Germany.

- Terré, C. (1990). *Conduite à Distance d'un Robot Mobile pour la Sécurité Civile : Approche Ergonomique*. Thèse, Université René-Descartes, Paris, France.
- Todorov, E., & Jordan, M.I. (1998). Smoothness maximization along a predefined path accurately predicts the speed profiles of complex arm movements. *Journal of Neurophysiology*, *80*, 696-714.
- Turvey, M.T., & Shaw, R.E. (1979). The primacy of perceiving : an ecological reformulation of perception for understanding memory. In L.G. Nilsson (Ed.), *Perspectives on Memory Research*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Vallar, G. (1998). Spatial hemineglect in humans. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 87-96.
- Vallar, G., & Perani, D. (1986). The anatomy of unilateral neglect after right hemisphere stroke lesions : a clinical CT-scan correlation study in man. *Neuropsychologia*, *24*, 609-622.
- Vanderhaegen, F., Crevits, I, Debernard, S., & Millot, P (1994). Human-machine cooperation : toward an activity regulation assistance for different air-traffic control levels. *International Journal of Human-Computer Interaction*, *6*, 65-104.
- 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.
- Vercher, J.L., Gauthier, G.M., Bertrand J.C. & Mageses G. (1989). Bimanual micro-manipulator for televideo-operation of anthropomorphic robots. *IEEE SMC 89, Cambridge, MA*, *2*, 804-805.
- Vieilledent, S., Kerlirzin, Y., Dalbera, S., & Berthoz, A. (2001). Relationship between velocity and curvature of a human locomotor trajectory. *Neuroscience Letters*, *305*, 65-69.
- Viviani, P., & Cenzato, M. (1985). Segmentation and coupling in complex movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *21*, 32-53.
- Viviani, P., & Flash, T. (1995). Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony : converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, *21*, 32-53.
- Viviani, P., & Schneider, R. (1991). A developmental study of the relationship between geometry and kinematics in drawing movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *17*, 198-218.
- Vygotsky, L.S. (1930). La méthode instrumentale en psychologie. In B. Schneuwly & J.P. Bronckart (Eds), *Vygotsky Aujourd'hui*. Delachaux et Niestlé.

- Wann, J.P., Nimmo-Smith, I., & Wing, A.M. (1988). Relation between velocity and curvature in movement : equivalence and divergence between a power law and minimum-jerk model. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *14*, 622-637.
- Warren, W.H. (1984). Perceiving affordances : visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *10*, 683-703.
- 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.
- Warren, W.H., & Whang, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures : body-scaled information for affordances. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *13*, 371-383.
- Whittaker, W., & Champeny, L. (1988). Conception and development of two mobile teleoperated systems for TMI-2. In *Processings of the International Meeting and Topical Meeting TMI-2 Accident*. American Nuclear Society.
- Wilson, B., Cockburn, J., & Halligan, P.W. (1987). *Behavioral Inattention Test*. Bury St Edmonds, UK : Thames Valley Test Company.
- Woods, D.D., & Roth, E.M. (1995). Symbolic AI computer simulations as tools for investigating the dynamics of joint cognitive systems. In J.M. Hoc, P.C. Cacciabus & E. Hollnagel (Eds), *Expertise and Technology : Cognition and Human-Computer Cooperation*. Hillsdale : Lawrence Erlbaum, 75-90.
- Yan, J.H., Thomas, J.R., Stelmach, G.E., & Thomas, K.T. (2000). Developmental features of rapid aiming arm movements across the lifespan. *Journal of Motor Behavior*, *32*, 121-140.
- Zhai, S., Milgram, P., & Rastogi, A. (1997). Anisotropic human performance in six degree-of-freedom tracking : an evaluation of 3D display and control interfaces. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, *27*, 518-528.

## Résumé

Cette thèse a consisté à configurer un robot téléopéré de réhabilitation de manière à ce qu'il soit le plus adapté possible à l'opérateur, ceci afin de parvenir à une réelle coopération entre l'homme et la machine (CHM). Pour cela nous avons employé une approche expérimentale qualifiée d'anthropomorphique. Celle-ci a été appliquée tant au niveau de l'architecture structurale que de l'architecture fonctionnelle de l'engin de téléopération. Du point de vue structural, cette approche a visé à configurer la machine telle que les relations topologiques entre capteur visuel et organe effecteur respectent une morphologie de type humain. Sur le plan fonctionnel, des mécanismes d'anticipation visuo-motrice d'inspiration humaine ont été implémentés sur le robot mobile. Par la suite, ces configurations ont été comparées à des conditions suivant une échelle d'anthropomorphie décroissante. Afin d'évaluer dans quelles conditions l'opérateur parvenait au meilleur niveau d'adaptation à la machine, des marqueurs révélant la présence d'un phénomène d'appropriation sensori-motrice ont également été utilisés. Les résultats expérimentaux mettent en évidence (i) que les configurations anthropomorphiques sont celles qui permettent à l'opérateur de s'approprier le plus aisément un engin de téléopération, (ii) que l'atteinte d'une appropriation du système s'effectue par des processus à dominante différente (assimilation vs accommodation) selon le caractère plus ou moins fidèle de la copie du comportement humain implémentée. Enfin, ces travaux de robotiques suggèrent que l'individu circonscrit moins son schéma corporel à son enveloppe charnelle qu'à son espace d'action, montrant ainsi que l'étude de l'homme en situation de téléopération a beaucoup à apporter à la compréhension de celui-ci.

**Mots clés :** appropriation sensori-motrice, téléopération, CHM, anthropomorphisme, schéma corporel, assimilation/accommodation.