

# Conception bio-mimétique d'un système de téléopération dans l'optique d'une Coopération Homme-Machine

P. Hoppenot<sup>1</sup>

Y. Rybarczyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LSC, CNRS FRE 2494, Université d'Evry

<sup>2</sup>LMP, CNRS UMR 6152, Université de Marseille

[hoppenot@iup.univ-evry.fr](mailto:hoppenot@iup.univ-evry.fr)

## Résumé

*La commande à distance d'une machine par un opérateur humain pose le problème de l'interprétation du comportement de la machine par l'opérateur. Piaget explique l'assimilation par deux processus complémentaires : l'adaptation et l'accommodation. Nous montrons ici comment une conception bio-mimétique d'un système de téléopération permet à l'opérateur de s'adapter à la machine en développant principalement des mécanismes de type assimilateur.*

## Mots Clef

Appropriation sensori-motrice, téléopération, Coopération Homme-Machine, anthropomorphisme, schéma corporel, assimilation, accommodation.

## 1. Introduction

Le principal problème de l'humain en situation de téléopération provient de l'appauvrissement sensoriel résultant de la séparation entre l'entité qui commande l'action (l'humain) et celle qui l'exécute (la machine). Les mécanismes de contrôle sensori-moteurs qui, d'ordinaire, sont naturellement automatisés chez l'individu nécessitent alors un enclenchement simultané de boutons, avec un nombre de combinaisons possibles très important ([14]). 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 ([45]). La première idée a été de rendre les machines les plus autonomes possibles afin de limiter l'intervention de l'homme. Elle visait à plus de fiabilité et de sécurité. Vers la fin des années 1980, 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. Sa capacité à résoudre des problèmes issus de situations nouvelles est, en effet, une de ses caractéristiques essentielles. La machine est conçue comme un robot non plus autonome, mais fonctionnant en interaction avec l'opérateur.

Dans ce type d'organisation la répartition des tâches ([10]) ou l'allocation des fonctions ([17]) 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 ([7]). Pourtant cette stratégie souffre de critiques répétées ([30]). Parmi les plus pertinentes d'entre-elles on en note une principale. Si l'on applique ce type de répartition, certaines fonctions échoueront à l'opérateur et les autres à la machine. 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 ([44]). L'introduction de la notion de systèmes cognitifs conjoints appliquée aux systèmes homme-machine a été une étape décisive ([18]). D'après Karsenty et Brézillon ([22]), "le système doit faciliter l'appropriation des réponses du système par l'utilisateur". Ainsi, le problème dans la coopération ne serait pas seulement celui de la répartition des tâches entre l'homme et la machine mais aussi celui de l'interprétation du comportement de la machine par l'opérateur humain.

La téléopération, quant à elle, se caractérise par une action à distance sur un environnement. L'opérateur se situe dans un poste de commande fixe et pilote un système. Ce dernier renvoie à l'opérateur des informations sur son état et celui de l'environnement grâce à différents types de capteurs. Certains auteurs restreignent la notion de téléopération au simple mode manuel de contrôle. Il semble judicieux de l'élargir à tout le spectre de commande à distance d'un robot, du mode purement manuel jusqu'à la simple supervision en passant par toute une gamme de modes partagés entre l'opérateur et le système.

Pour développer un système de téléopération, il faut tenir compte des deux entités en présence qui induisent chacune des contraintes. Les contraintes techniques liées à la machine et à sa communication avec l'opérateur humain ne sont pas traitées ici. La présence de l'homme induit aussi des contraintes. En situation normale, l'être humain possède une grande richesse et une grande diversité d'informations sensorielles (visuelles, auditives, tactiles, vestibulaires et somesthésiques). En situation de téléopération, certaines sont dégradées ou absentes. Deux modalités sensorielles sont généralement surexploitées par l'opérateur : la vision et la proprioception. La

modalité proprioceptive est moins exploitée que la vision (42]). Nous avons choisi de nous orienter vers la modalité visuelle pour le retour d'information à l'opérateur.

Le passage d'une machine autonome à une situation de téléopération par l'intermédiaire de modes de commande partagée pose la question de l'appropriation par l'homme de l'outil qu'est le robot. Dans ces travaux en robotique, Rabardel présente l'instrument comme une entité mixte qui ne peut se réduire à l'artefact, c'est-à-dire sa composante physique ([39]). Au contraire, il tient à la fois de l'objet et du sujet. 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 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. 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.

Selon Piaget, l'intelligence est avant tout adaptation qui peut se décomposer en deux processus complémentaires ([37]). Le premier est l'assimilation qui consiste en la généralisation de schèmes préexistants. Par leur proximité d'apparence ou de situation, des objets nouveaux peuvent être assimilés dans des schèmes préexistants et se voir attribuer des significations qui contribuent, de plus, à un élargissement du réseau de connaissances. Le second, l'accommodation, consiste en la différenciation des schèmes préexistants et aboutit à l'élaboration de nouveaux schèmes.

La relation homme-machine est du même ordre. 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 (Fig. 1). Deux directions sont alors possibles. La première consiste à réduire l'écart entre les schèmes spontanés de l'opérateur et ceux appropriés à la commande de la machine, vue comme un prolongement des fonctions motrices du sujet. L'opérateur tendra alors à attribuer ces propres caractéristiques à la machine ([9]). La seconde direction vise à prendre acte de cet écart. La conception ergonomique cherchera à le mettre en évidence afin d'en faciliter la conceptualisation par le sujet. Notre dispositif présentant potentiellement des caractéristiques (bras anthropomorphe, contrôle en coordonnées cartésiennes, vision mobile...) ne semblant pas, *a priori*, préjudiciables à une projection de l'opérateur dans le système, c'est vers le choix

anthropomorphe que cette étude s'est naturellement tournée.

Le système ARPH présente des caractéristiques anthropomorphes de deux natures. La première concerne l'aspect morphologique du bras manipulateur. Le paragraphe 2 traite du positionnement du référentiel visuel par rapport à l'organe préhenseur. La seconde a trait à un aspect plutôt morpho-fonctionnel de la base mobile : le déplacement et les mécanismes d'anticipation visuo-motrice mis en jeu (paragraphe 3).

## **2. Aspect morphologique - Positionnement du référentiel visuel par rapport à l'organe préhenseur**

### **2.1. Cadre de l'étude**

L'organisation de l'espace a été abordée selon différents points de vue. D'un point de vue psychophysique, 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. Cela amène à distinguer trois espaces concentriques autour de l'opérateur. L'espace personnel correspond à l'espace qui peut être atteint par simple extension du bras. L'espace d'action atteint environ trente mètres. 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 des objets ou des projectiles. Au-delà, dans l'espace de vue, les mouvements sont moins détectables ([4]).

D'un point de vue neuropsychologique, on distingue un espace proche et un espace lointain. Des travaux ont été menés sur des sujets présentant un désordre neuropsychologique connu sous le nom de négligence. 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 ([15]).

Enfin, d'un point de vue neurophysiologique, des études ont montré que différentes aires cérébrales s'activent suivant que l'attention se porte dans l'espace péricorporel ou extracorporel ([21]).

Cette dichotomie en deux ou trois espaces autour du sujet n'a bien sûr pas de limites très précises. Le schéma corporel résultant a des propriétés dynamiques. [19] montre que lorsqu'un singe utilise un outil, son espace péricorporel s'étend jusqu'au domaine atteignable par cet outil. Dans le cas de négligence pour l'espace péripersonnel, celle-ci s'étend à la dimension de la baguette ([1]). Ces récentes découvertes en neurophysiologie et neuropsychologie prouvent 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. 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 ([28]). 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 des discordances visuo-kinesthésiques ([31]). 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.

## 2.2. Objectifs expérimentaux

L'objectif expérimental principal vise 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 (2.4). Il faut pour cela disposer d'un outil de mesure de l'appropriation. 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 (2.3). Enfin, 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 (2.5).

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

Warren et Whang ont proposé une méthode de mesure pour évaluer l'impact des variables environnementales sur les variables de l'organisme ([49]). 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 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 fournie par l'indice  $\Pi$  tel que :  $\Pi = D/R$ . Le grand intérêt 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 ([6]).

Ici,  $\Pi$  représente l'estimation que le sujet a de la distance maximale de saisie du bras rapportée 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 nombre  $\Pi$  obtenu en condition robotique (avec le bras MANUS) est comparé à celui obtenu en condition naturelle (avec le propre bras du sujet). Notre hypothèse est que malgré l'absence de contact physique direct entre l'outil et l'opérateur, ce dernier devrait parvenir à inclure le champ d'activité du robot dans son propre schéma corporel, preuve ainsi d'une appropriation par assimilation. Si les divers  $\Pi$  calculés ne diffèrent pas significativement entre les deux conditions, on pourra alors conclure que ce résultat constitue un argument expérimental en faveur d'une extension possible de l'espace péricorporel de l'opérateur assimilant l'espace compris jusqu'à l'extrémité du bras manipulateur.

Deux conditions expérimentales ont été comparées. 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. La caméra est située à gauche du bras robotique (Fig. 2). On a une configuration anthropomorphique droite. Dans la condition naturelle, les sujets 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.

Pour le calcul de l'indice,  $R$  est la mesure réelle de l'extension du bras de l'opérateur ou du bras artificiel. L'estimation de  $D$  est plus complexe. Pour cela huit positions d'objet ont été choisies en fonction de la valeur de la longueur référence ( $R$ ) obtenue en calibrage. Ainsi, la répartition de ces huit positions est choisie de telle sorte qu'elles soient centrées autour de cette valeur référence, afin qu'il y ait autant de positions supraliminaires que d'infra-liminaires, 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 dans cinq directions (Fig. 2). Une fois les 80 réponses par direction enregistrées celles-ci sont comptabilisées, la distance seuil ( $S$ ) étant la valeur correspondant au pourcentage de réponse oui et non identique, égale à 50%.

Le premier résultat majeur de cette expérience est de révéler l'absence de différence statistiquement significative entre la valeur  $\Pi$  de la condition de téléopération et celle de la condition de référence humaine. 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. 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 directions entre les deux conditions expérimentales. Contrairement à la situation naturelle, la condition robotique donne un  $\Pi$  largement inférieur à 1 au niveau des directions centrales ( $0^\circ$  et  $20^\circ$ ), les directions latérales ( $-40^\circ$ ,  $-20^\circ$  et  $40^\circ$ ) étant quant à elles comparables d'une condition à l'autre. 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. De nombreux travaux scientifiques réalisés dans le domaine de l'estimation des distances en vision monoculaire ou avec une perception limitée ( $50^\circ$  à l'écran pour  $160^\circ$  en condition naturelle) ont montré une tendance à la sous-estimation des distances par les sujets ([3]). En revanche, [8] montre que l'espace péripersonnel d'un individu est assimilable à des secteurs arrondis, sphériques ou cylindriques, centrés sur chaque partie singulière du corps. Or, contrairement

au bras humain, le bras Manus présente un rayon d'extension plus important devant (direction  $0^\circ$  de notre dispositif) que sur les côtés. Ce biais d'allonge explique la variation de  $\Pi$ . En ne prenant en compte que le numérateur de  $\Pi$ , soit la distance évaluée par l'opérateur, on constate 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. On peut en 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.

#### **2.4. 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 se pose 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. Les conditions expérimentales de cette seconde partie correspondent à des degrés progressifs de déformation de la relation vision-manipulation par rapport à la morphologie humaine, la caméra étant positionnée à côté de l'épaule, de biais à  $45^\circ$  ou de côté à  $90^\circ$  (Fig. 2). L'hypothèse que nous émettons est que plus la configuration de l'ensemble caméra-bras robotique s'apparente à une architecture morphologique de type humain, plus l'appropriation devrait être élevée.

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. Il est intéressant de souligner que l'écart type de la condition biais ( $\sigma=0.1$ ) est presque deux fois plus élevé que pour la condition anthropomorphe ( $\sigma=0.06$ ).

De plus, on observe l'augmentation du facteur  $\Pi$  au fur et à mesure que la configuration s'éloigne de la condition anthropomorphe.

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

Pagano et Bingham ([32]) ont mis en évidence une absence de corrélation entre un jugement verbal et un jugement moteur de la perception monoculaire des distances. Ainsi, on ne peut pas se limiter à une évaluation perceptive et donc 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 ([48]), nous avons déjà pu les regrouper en deux niveaux d'analyse distincts : le phénoménologique et le comportemental. Le premier niveau d'analyse traite des performances brutes. Nous en avons retenu deux. Le taux de réussite correspond au nombre de fois où l'opérateur parvient à saisir l'objet sur le nombre total de tentatives. Le second paramètre phénoménologique correspond au temps moyen d'exécution du mouvement. Quant au niveau comportemental, il consiste en une comparaison avec un modèle. Là encore, deux critères sont évalués. Le premier, inspiré de [27], mesure l'erreur spatiale, 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 :  $S = R/T$ . Le second critère concerne la coordination entre le mouvement du bras et l'ouverture de la pince. [20] montre une synchronisation entre leur changement de cinématique et une anticipation de l'ouverture de la pince dès le début de la phase dite de transport. Nous allons donc mesurer le nombre d'occurrences de simultanéité de ces deux tâches et le moment de déclenchement de l'ouverture.

Les caractéristiques du dispositif expérimental sont identiques à celle du paragraphe 2.4 (Fig. 2). Le taux de réussite de saisie met en évidence un effet de session, pour les trois conditions confondues, indiquant une adaptation progressive de l'opérateur au système. De plus, la condition anthropomorphe donne un taux de réussite de saisie statistiquement plus élevée que dans les deux autres conditions. On note aussi un effet de direction avec un pourcentage de réussite de saisie supérieur pour les directions centrales par rapport aux latérales pour les trois conditions confondues, qui disparaît pour la condition anthropomorphe seule. Pour le temps d'exécution, on observe aussi un effet de session. Mais la condition anthropomorphe n'est significativement plus véloce que par rapport à la condition côté. Les conclusions quant à l'effet de rayon sont identiques à celles du taux de réussite.

Pour les paramètres comportementaux, l'erreur spatiale est elle aussi sensible à l'effet de session. Les trajectoires de la pince dans la condition anthropomorphe apparaissent plus rectilignes que dans la condition de côté mais pas par rapport à la condition de biais. On trouve ici aussi un effet de direction, significatif pour toutes les conditions réunies mais qui disparaît pour la seule condition anthropomorphe. En ce qui concerne la coordination motrice, le pourcentage de contrôle simultané de l'ouverture de la pince avec le déplacement du bras croît de manière significative au cours des

sessions. Là encore, la condition anthropomorphe est significativement supérieure à la condition côté mais pas à la condition biais. L'effet de direction joue pour l'ensemble des conditions mais pas pour la condition anthropomorphe seule. L'initiation de l'ouverture de la pince donne les mêmes résultats, tant sur le plan des sessions que sur celui des comparaisons de conditions.

De l'ensemble de ces résultats, on peut déduire qu'une condition anthropomorphe 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'appropriier la machine, par un processus assimilateur.

### **3. Aspect morpho-fonctionnel - Implémentation de mécanismes d'anticipation visuo-motrice**

#### **3.1. Cadre de l'étude**

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 ([29]). Les limitations visuelles sont de deux types : temporel et spatial. D'un point de vue temporel, des travaux ont montré qu'un délai supérieur à 300 millisecondes (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 ([26]). 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. Même si l'on respecte ces conditions, 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 ([2]), dont on connaît le rôle majeur dans le contrôle du déplacement ([11]). 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 ([16]). 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 ([40]).

Pour pallier ces difficultés, l'anticipation visuo-motrice semble une bonne solution comportementale. 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 ([24]). 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 ([12]). 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 ([25]). 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 réaligement de la tête dans la direction de la marche ne s'effectuant qu'après le franchissement de l'obstacle ([13]). Ceci suggère que l'orientation du regard est contrôlée pas à pas selon un mécanisme prédictif de la nouvelle direction à emprunter ([34]). De plus, il est important de souligner que ces deux études de Grasso mettent en évidence la dynamique d'orientation de la tête, que l'individu ait à réaliser une trajectoire courbe ([12]) ou un contournement de repère ([13]). Cela montre que ces deux tâches semblent relativement similaires quant aux mécanismes de contrôle sensori-moteur qu'elles mettent en jeu.

### 3.2. Objectifs expérimentaux

Nous allons tester ce phénomène d'anticipation pour la commande de la base mobile. Une analogie a été effectuée entre la direction du regard humain et la caméra mobile qui équipe le robot. Vu l'architecture fonctionnelle de notre système, deux possibilités d'implémenter une anticipation visuelle sur le déplacement s'offrent à nous : 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. Les hypothèses de notre travail expérimental sont 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.

### 3.3. Résultats expérimentaux

Trois modes de commande ont été testés, deux modes avec anticipation visuelle et un mode sans anticipation visuelle. Le mode sans anticipation, appelé mode fixe, correspond à une commande manuelle de la base mobile, la caméra restant fixe dans l'axe du robot. Il sert de mode témoin. Dans le premier mode d'anticipation visuelle, appelé mode plate-forme, l'opérateur commande la base mobile et la caméra s'oriente automatiquement vers la tangente à la trajectoire ("je regarde là où je vais") (Fig. 3-a). Cette implémentation ne suit pas le mode anthropomorphique. Dans le second mode d'anticipation visuelle, appelé mode caméra, l'opérateur commande la caméra et la base mobile suit ce mouvement ("je vais là où je regarde") (Fig. 3-b). Cette implémentation suit le mode anthropomorphique.

On émet l'hypothèse que lorsque le couplage visuo-locomoteur suit une organisation de type humain, l'appropriation devrait s'effectuer par un processus à dominante assimilatrice. On demande à l'opérateur de réaliser un slalom.

Deux types de paramètres sont utilisés pour mesurer le degré d'appropriation et le processus dominant d'appropriation : des performances brutes (temps d'exécution des parcours, nombre de collisions, nombre d'arrêts) et des indices comportementaux (lissage des trajectoires, loi de puissance). Pour les premiers, les deux conditions anticipatrices sont chacune significativement plus rapides que la condition fixe. En ce qui concerne le nombre de collisions, seule la condition caméra donne significativement moins de collisions que la condition fixe même si la condition plate-forme a un nombre moyen de collisions assez proche de celui de la condition caméra. Quant au nombre d'arrêts, dans les deux conditions anticipatrices ils sont très significativement moins fréquents que dans la condition fixe.

Passons maintenant aux indices comportementaux. Les trajectoires réalisées en condition fixe sont beaucoup plus anguleuses que celle en condition anticipatrice. C'est caractéristique d'une commande plus heurtée, moins fluide. Une manière de quantifier ce lissage est 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 ([36]). Concrètement, le rayon de courbure ( $r$ ) est calculé comme le rapport de la vitesse linéaire instantanée ( $v$ ) sur la vitesse de rotation instantanée ( $w$ ). Ainsi, si le robot a une vitesse linéaire faible et une vitesse de

rotation élevée, le rayon de courbure sera petit ( $<1$ ), d'autant plus petit que la vitesse de rotation sera importante. Inversement, si le véhicule avance et tourne en même temps (trajectoire curvilinéaire), le rayon de courbure sera très grand ( $>1$ ).

La Fig. 4 représente le pourcentage d'occurrence des rayons de courbure, exprimé en logarithme décimal, pour les trois conditions. On remarque un pic autour de 0. Cela correspond à des rayons de courbure moyens et donc des portions de trajectoire courbe. Si l'on regarde plus en détail, on remarque que ce pourcentage est plus élevé pour la condition caméra que pour la condition plate-forme, lui-même plus élevé que pour la condition fixe. Toutes ces différences sont significatives. On constate même la présence d'un second pic de rayons de courbure, toujours exprimé en logarithme décimal, aux alentours de -2. Il s'agit là de rotations sur place de la base mobile. Ce pourcentage est significativement plus élevé en condition fixe qu'en condition plate-forme, lui-même significativement plus élevé qu'en condition caméra. L'expérience a été réalisée en quatre sessions et montre que ces effets sont valables pour toutes les sessions. 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.

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 ([43]). Aussi, cette optimisation ne semble pas se limiter simplement aux particularités géométriques de la trajectoire mais également au rapport existant entre cette géométrie (rayon 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 ([47]) ou 3D ([41]). Ces mouvements ont été découverts comme obéissant à ce qu'on appelle la "loi de puissance deux tiers" ([23]). 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. On constate même que cette loi ne semble pas seulement gouverner la génération des mouvements de bras mais, aussi, celle de la locomotion humaine ([46]).

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 ensemble suivant la condition de vision. 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 à cette loi biologique.

Les résultats sont très intéressants. En condition fixe, la corrélation entre le rayon de courbure et la vitesse linéaire n'est pas significative. Si l'on calcule néanmoins l'équation de la droite de régression linéaire liant leurs logarithmes, on obtient :  $y=0,01x+0$ . Les mêmes conclusions s'imposent pour la condition plate-forme avec une droite de régression quasiment identique :  $y=0,02x+0$ . Ainsi, pour ces deux conditions, il n'y a pas de corrélation significative entre la vitesse linéaire et le rayon de courbure et on ne voit pas apparaître de rapport 1/3. En revanche, la condition caméra donne des résultats bien différents. D'abord, le rayon de courbure et la vitesse sont significativement corrélés. Bien plus, la droite de régression linéaire liant le logarithme du rayon de courbure et celui de la vitesse linéaire est de pente 1/3 (Fig. 5).

Pour résumer ces résultats, si les conditions anticipatrices sont nettement supérieures à la condition fixe, la condition caméra l'emporte tout de même. Premièrement, elle est la seule pour laquelle aucun effet de session ou d'apprentissage n'apparaît pour aucun des cinq paramètres étudiés. Etant donné que la vitesse d'acquisition d'un système renseigne sur la nature du processus dominant impliqué dans cette acquisition, 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. Ensuite, on constate des différences plus franches entre le mode caméra et le mode fixe qu'entre le mode plate-forme et le mode fixe. C'est par exemple le cas pour le nombre de collisions significativement plus faible en condition caméra qu'en condition fixe alors qu'il ne l'est pas entre les conditions plate-forme et fixe. Le dernier argument est sans conteste la conformité à la loi de puissance du mode caméra, totalement absente pour le mode plate-forme. Cela plaide encore pour la mise en œuvre d'un mécanisme à dominante assimilatrice pour l'appropriation du robot par l'homme dans la condition caméra.

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

anthropomorphe 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 "anthropomorphe" 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 ([38]). 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 ([35]). 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 ([5], [33]).

#### 4. Conclusions et perspectives

La recherche de caractéristiques anthropomorphes pour une machine pilotée à distance favorise le processus d'adaptation par assimilation. Dans le travail sur l'aspect morphologique, l'opérateur humain arrive à un niveau d'appropriation assez élevé (2.3). Le paragraphe 2.4 montre que cette appropriation est meilleure en condition anthropomorphe que dans les deux autres ce qui permet de supposer que l'opérateur s'approprie le système selon un processus à dominante assimilatrice. Le paragraphe 2.5 permet de déduire que, lorsqu'une machine présente un mode de fonctionnement qui se rapproche du modèle humain, c'est en la configurant selon une architecture structurale anthropomorphe que l'opérateur pourra au mieux se l'approprier.

Des travaux sur l'aspect morpho-fonctionnel nous pouvons tirer deux conclusions. 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, plutôt qu'en terme de commande simultanée sur l'ensemble du système nerveux. 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 comme relevant bien d'un modèle interne de planification du mouvement propre à l'homme. On retrouve ici une adaptation de type assimilatrice.

Il est néanmoins intéressant de constater que lorsque l'opérateur humain met en œuvre une stratégie d'accommodation, par exemple dans le cas du mode plate-forme, les performances brutes peuvent être du même niveau que celles obtenues avec un système anthropomorphe. Ainsi, on peut chercher à développer aussi les capacités d'accommodation de l'opérateur. Cela permet d'obtenir une palette de commandes plus large.

#### Références

- [1] Berti, A., & Frassinetti, F. (2000). When far becomes near : remapping of space by tool use. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 415-420.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Cutting, J.E. (1997). How the eye measures reality and virtual reality. *Behavior Research Methods, Instrumentation and Computers*, 29, 29-36.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Fitts, P.M. (1951). *Human Engineering for an Effective Air Navigation and Traffic Control System*. Washington D.C. : National Research Council.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Gaillard, J.P. (1997). *Psychologie de l'Homme au Travail. Les Relations Homme-Machine*. Paris : Dunod.
- [11] Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston : Houghton Mifflin.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Halligan, P.W., & Marshall, J.C. "Left neglect for near but not for far space in man." *Nature*, 350, 498-500, 1991.
- [16] 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)*.
- [17] Hoc, J.M. (2000). From human-machine interaction to human-machine cooperation. *Ergonomics*, 43, 833-843.
- [18] Hollnagel, E., & Woods, D.D. (1983). Cognitive systems engineering : new wine in new bottles. *International Journal of Man-Machine Studies*, 18, 583-600.
- [19] Iriki, A., Tanaka, M., & Iwamura, Y. (1996). Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons. *Neuroreport*, 7, 2325-2330.
- [20] Jeannerod, M. (1984). The timing of natural prehension movements. *Journal of Motor Behavior*, 16, 235-254.
- [21] Jeannerod, M. (1997). *The Cognitive Neuroscience of Action*. Cambridge, MA: Blackwell.
- [22] Karsenty, L., & Brézillon, P. (1995). Coopération homme-machine et explication. *Le Travail Humain*, 58, 289-310.
- [23] Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54, 115-130.
- [24] Lacquaniti, F., Maioli, C. (1987). Anticipatory and reflex coactivation of antagonist muscles in catching. *Brain Research*, 406, 373-378.
- [25] Land, M.F. (1998). The visual control of steering. In L.R. Harris & K. Jenkin (Eds). *Vision and Action*, 163-180. Cambridge University Press.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Massimo, M., & Sheridan, T. (1989). Variable force and visual feedback effects and teleoperator man/machine performance. *Nasa Conference on Space Telerobotics*. Pasadena.
- [30] Older, M.T., Waterson, P.E., & Clegg, C.W. (1997). A critical assessment of task allocation methods and their applicability. *Ergonomics*, 40, 151-171.
- [31] Orliaguet, J.P., & Coello, Y. (1998). Geste d'homme, gestes de machine. *Science & Vie*, 204, 150-156.
- [32] 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.
- [33] Parasuraman, R., & Mouloua, M. (1996). *Automation and Human Performance : Theories and Applications*. Mahwah : Lawrence Erlbaum.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Piaget, J. (1936). *La Naissance de l'Intelligence chez l'Enfant*. Paris, Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- [38] 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.
- [39] Rabardel, P. (1991). Activity with a training robot and formation of knowledge. *Journal of Artificial Intelligence in Education*. USA.
- [40] Reinhardt-Rutland, A.H. (1996). Remote operation : a selective review of research into visual depth perception. *The Journal of General Psychology*, 123, 237-248.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.

- [44] 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.
- [45] Vercher, J.L., Gauthier, G.M., Bertrand J.C. & Magenes G. (1989). Bimanual micro-manipulator for televideo-operation of anthropomorphic robots. *IEEE SMC 89, Cambridge, MA*, 2, 804-805.
- [46] Vieilledent, S., Kerlirzin, Y., Dalbera, S., & Berthoz, A. (2001). Relationship between velocity and curvature of a human locomotor trajectory. *Neuroscience Letters*, 305, 65-69.
- [47] Viviani, P., & Cenzato, M. (1985). Segmentation and coupling in complex movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 21, 32-53.
- [48] 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.
- [49] 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.

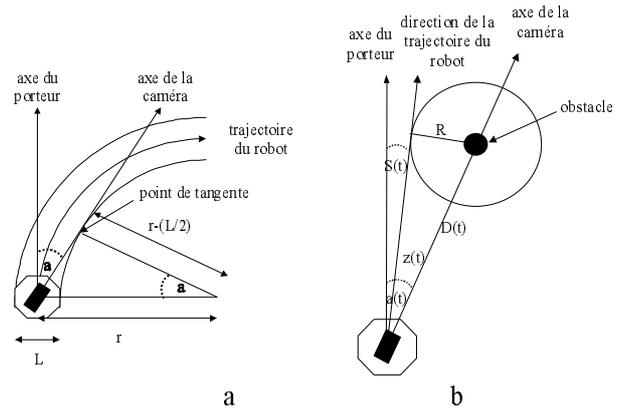


Fig. 3 - Modélisations anticipatrices.

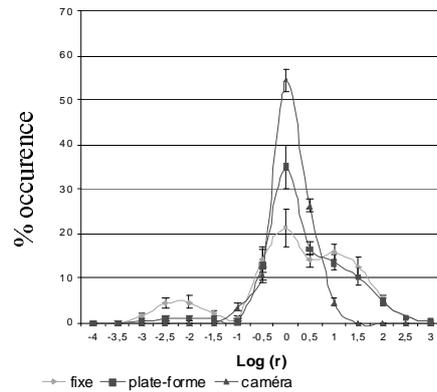


Fig. 4 - Lissage des trajectoires.

**Figures**

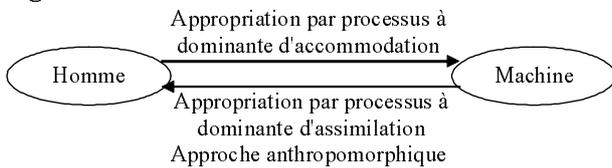


Fig. 1 - Application du modèle piagétien d'adaptation à la coopération homme-machine.

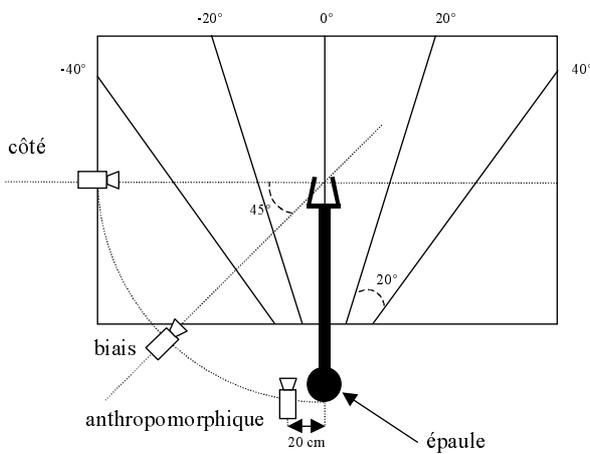


Fig. 2 - Caractéristiques du dispositif expérimental.

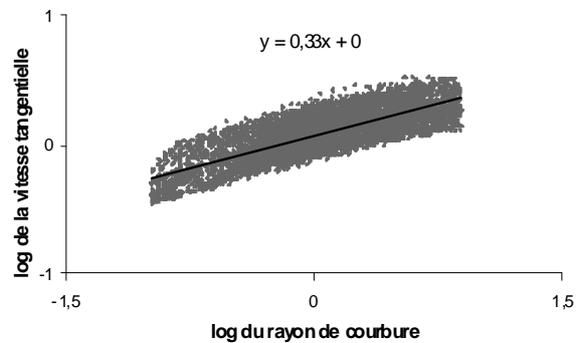


Fig. 5 - Représentation logarithmique et normalisée de la relation entre rayons de courbure et vitesses tangentielles pour l'ensemble des essais de la condition vision mobile caméra.