Partie III
Apprentissage et stabilité du contrôle visuo-manuel d'un système dynamique

Chapitre 7
Contribution des informations sensorielles à l'apprentissage: retour d'effort et indices prédictifs

La production de mouvements coordonnés nécessite l'intégration d'informations sensorielles d'origine proprioceptive et extéroceptive et la coopération de nombreuses structures neuronales. Les mécanismes responsables de la fusion et de l'intégration des signaux sensori-moteurs, essentiels à l'élaboration d'une commande motrice adaptée, ne sont pas, à l'heure actuelle, encore bien connus. Nous examinons, dans cette partie, les apports respectifs des informations sensorielles d'origine visuelle et haptique dans la réussite d'une tâche de poursuite visuo-manuelle nécessitant la manipulation d'un objet complexe (un système masse-ressort).

La réussite de cette tâche dépend essentiellement de la capacité des sujets à prendre en compte les caractéristiques de la dynamique du système manipulé. L'identification de ces propriétés demande un apprentissage au cours duquel les informations sensorielles jouent un grand rôle. En effet, ce n'est qu'en observant les conséquences sensorielles de ses mouvements que le sujet peut adapter sa stratégie de contrôle. Le premier thème abordé concerne l'étude de l'apport d'un retour d'effort (c'est à dire de la présence d'informations sensorielles d'origine haptique) sur le niveau de performance des manipulateurs. Ce retour d'effort peut contribuer à améliorer la réussite de cette tâche en tant que source d'information sensorielle suppléant les informations visuelles. Il est susceptible, à ce titre, de participer à l'apprentissage de la dynamique du système manipulé et ainsi d'améliorer la précision de la «connaissance interne» que les sujets peuvent mobiliser lors de la tâche. Mais il peut agir également comme une perturbation gênant un contrôle exercé sur une base purement visuelle. Le premier chapitre de cette partie nous permettra de discuter la contribution des informations haptiques sur la réussite de cette tâche et de cerner leur implication dans la construction et l'adaptation d'un hypothétique modèle interne de l'objet manipulé.

Dans le second chapitre de cette étude expérimentale, nous nous proposons d'étudier plus précisément les stratégies de contrôle des sujets. Nous verrons qu'au regard de la nature intermittente des mouvements

produits, il est possible de proposer une hypothèse inspirée des schémas de contrôle précédemment examinés et en particulier de l'approche utilisant des variables composites. Nous testerons la validité de cette hypothèse et discuterons son degré de généralité.

7.1 Introduction

Les informations sensorielles de nature proprio et extéroceptive peuvent conceptuellement intervenir dans la génération des commandes motrices de deux façons différentes (figure 23). Les signaux issus des récepteurs sensoriels (et en particulier les signaux d'origine haptique[30]) interviennent d'abord dans la production de mouvements comme des variables contrôlées au sein de boucles de servorégulation. Mais il est raisonnable de penser que les informations haptiques sont également impliquées dans l'adaptation des processus moteurs et l'établissement de modèles dynamiques internes. Parmi ces informations, certaines renseignent le système nerveux central sur les forces d'interaction entre différents segments du corps ou entre celui-ci et des objets manipulés. De ce point de vue, ces signaux peuvent permettre d'affiner les relations entre une intention de mouvement, les conséquences sensorielles de ce mouvement, et la commande motrice correspondante. La contribution de cette adaptation à la réussite d'une tâche particulière n'est pas immédiate et doit apparaître peu à peu, progressant avec la pratique des sujets.

7.1.1 Proprioception et rétrocontrôle des mouvements

Les informations proprioceptives sont clairement impliquées dans des boucles de rétroaction contrôlant l'activité musculaire. De nombreux travaux ont abordé cette question par l'étude des caractéristiques cinématiques et dynamiques des mouvements produits par

- des patients justement dépourvus de ce type d' information [81, Ghez et al., 1990] [153, Marsden et al., 1984] [26, Blouin et al., 1993] ,
- des animaux déafférentés par chirurgie [125, Knapp et al., 1963] [192, Polit et Bizzi, 1979] ,
- des sujets dont le fonctionnement des récepteurs sensoriels est perturbé par une vibration des tendons [39, Capaday at Cooke, 1983] [106, Inglis et Frank, 1990] [117, Kasai et al., 1992] , l'anesthésie ou l'ischémie [211, Sanes and Jennings, 1984] .

Dans le noir, des singes déafférentés et vestibulectomisés sont incapables de programmer correctement les mouvements de tête vers une cible visuelle [22, Bizzi et al., 1982] (Bizzi 1982, Bizzi 1982). Sans l'aide de la vision, des patients humains dépourvus de sensations proprioceptives de leur bras sont incapables d'en maîtriser l'anisotropie mécanique lors de mouvements pluriarticulaires [81, Ghez et al., 1990] . Ces études (et bien d'autres) montrent effectivement que la proprioception est indispensable au rétrocontrôle des mouvements.

Il faut cependant noter que les mouvements sont rarement accomplis sans contraintes dynamiques. Celles-ci proviennent des interactions avec l'environnement (en particulier la pesanteur) et avec les objets manipulés.

[30] La définition classique des «informations sensorielles d'origine haptique» est l'ensemble des signaux fournis à la fois par les récepteurs sensoriels du toucher et de la proprioception.

Les forces d'interaction sont détectées et mesurées par des capteurs situés dans les muscles, les tendons, les articulations et la peau. Au niveau cortical, la fréquence de décharge de neurones du tractus pyramidal et d'autres cellules corticomotoneurales de l'aire 4 semble, chez le singe, être étroitement corrélée avec la force exercée au niveau de l'articulation [44, Chaney et Fetz, 1980] [148, Maier et al., 1993] ou la variation temporelle de cette force [77, Georgopoulos et al., 1992] .

Le retour d'effort[31] est rarement implanté sur les systèmes de téléopération, bien que ces interfaces augmentent les performances des opérateurs effectuant des tâches d'insertion [14, Bejczy, 1977] [16, Bejczy at Handlykken, 1981] [15, Bejczy, 1982] ou de manipulation nécessitant un suivi de surfaces [200, Reger, 1987] . L'implémentation d'un retour d'effort non haptique (sonore ou visuel) facilite également la téléopération [15, Bejczy, 1982] [203, Richard et al., 1995] . Le retour d'effort peut également être utilisé pour augmenter les retours kinesthésiques : l'application de champs de forces (générés par des ressorts linéaires ou non linéaires) sur le bras d'opérateurs normaux ou sujets spastiques effectuant une tâche d'acquisition de cible permet d'augmenter leur niveau de performance [201, Repperger et al., 1995] . Ainsi, la perception des interactions dynamiques semble également jouer un grand rôle dans le contrôle de la dynamique des mouvements.

7.1.2 Perception haptique et apprentissage des transformations sensori-motrices

Quels rôles jouent la proprioception et plus généralement les sensations haptiques[32] dans le contrôle des mouvements ? Opèrent-elles strictement par des mécanismes de rétroaction ou interviennent-elles également dans l'apprentissage des stratégies motrices ? De nombreux modèles se servent des informations sensorielles pour adapter, par l'apprentissage, ce que nous nommerons des processus sensori-moteurs adaptatifs, que ceux-ci soient modélisés par des servocontrôles à gains réglables ou par des générateurs de commandes en boucle ouverte [9, Atkeson, 1989] [97, Hanneton et al., 1997] [112, Jordan et Rumelhart, 1992] [120, Kawato et Gomi, 1992] [121, Kawato et Gomi, 1993] [263, Wolpert et al., 1995] . Bien que ces études soient, pour la plupart, basées sur la contribution des signaux visuels à un apprentissage supervisé, la proprioception et en particulier la perception des forces peuvent également être utilisées dans l'adaptation des paramètres des transformations sensori-motrices impliquées dans le contrôle des mouvements [87, Gomi et Kawato, 1993] . Ces aspects théoriques intéressent également la théorie du contrôle adaptatif des systèmes non linéaires parce que les capacités d'un robot à manipuler des masses inconnues ou à maîtriser la force qu'applique son bras nécessite la combinaison de données cinématiques et dynamiques (mesures de forces) [138, Lensky et al., 1986] [261, Whitney, 1977] . Les informations de forces peuvent ainsi être utilisées pour identifier les propriétés dynamiques d'un objet manipulé [8, Atkeson, 1986] ou pour intégrer cette dynamique externe dans un schéma

[31] Le terme «retour d'effort», appartenant au domaine de la téléopération, désigne un système de reproduction des forces d'interaction mesurées par des capteurs du système distant sur le bras ou la main de l'opérateur au moyen d'actionneurs placés sur l'interface de commande.

[32] Le terme «haptique», anglicisme sans équivalent français, désigne les informations sensorielles d'origine kinesthésique (récepteurs des muscles, tendons et capsules articulatoires) et somesthésiques (récepteurs de la peau et du toucher).

de contrôle global comprenant le corps plus le système dynamique externe [161, McRuer, 1980] . De ce point de vue, la perception des forces peut jouer un rôle très important dans la manipulation car elle permet un accès direct aux propriétés dynamiques des objets.

Plusieurs observations expérimentales sont en faveur d'une participation de la proprioception à l'apprentissage de transformations sensorimotrices. Les signaux proprioceptifs peuvent agir sur les programmes moteurs par une modification des gains des boucles de contrôle ou bien du couplage entre les muscles [131, Lacquaniti et al., 1992] [175, Nashner, 1976] . Pendant les vols spatiaux, l'apesanteur change de façon drastique la dynamique des relations entre le corps en mouvement et son environnement. La proprioception joue un grand rôle dans l'adaptation rapide des astronautes à cette nouvelle condition et dans leur réadaptation lors du retour sur terre [144, Lipshits et al., 1993] [145, Lipshits et al., 1993] [208, Ross et al., 1986] . Enfin, la proprioception renseigne également le système nerveux central sur les propriétés dynamiques (moment inertiel par exemple) des objets manipulés [103, Hoisington, 1920] [245, Tan et al., 1995] . Il est légitime de penser que ces informations peuvent être utilisées pour mieux adapter le geste associé à un usage de l'objet. Mais comment dissocier, lors d'une expérience, la contribution des informations proprioceptives au contrôle en retour des mouvements de leur participation aux processus moteurs adaptatifs ? Ces processus s'améliorent par la pratique via un apprentissage. Par conséquent, si une modalité sensorielle participe à l'adaptation d'un schème moteur, cette participation doit se refléter dans la qualité de l'apprentissage c'est à dire dans sa vitesse ou dans la «quantité d'apprentissage» pour la tâche considérée. Par contre, si cette modalité ne joue un rôle que parce qu'elle intervient dans une boucle de contrôle non adaptative, sa contribution apparaîtra dans le niveau de performance des sujets sans évoluer avec la pratique de la tâche (voir figure 23).

7.1.3 La tâche proposée

Nous proposons d'étudier ici la contribution de la perception haptique aux processus moteurs adaptatifs dans le cadre d'une tâche de poursuite visuo-manuelle. La tâche proposée implique le contrôle d'un système mécanique (simulé) comprenant une masse, un ressort et un amortisseur. La consigne donnée aux sujets est de poursuivre une cible avec un pointeur représentant la position de la masse sans que ceux-ci soient informé de la nature du système qu'ils contrôlent grâce à un manche à balais. Cette tâche les oblige à générer une transformation sensori-motrice dynamique entre une trajectoire désirée (la trajectoire de la cible) et des mouvements adaptés du bras. Une tâche similaire a déjà été utilisée pour étudier le rôle des informations visuelles dans le contrôle visuo-manuel des systèmes dynamiques [161, McRuer, 1980] . Ces études ont montré que les sujets étaient capables de produire des trajectoires très proches de celle de la cible et ceci pour une grande variété de systèmes dynamiques (systèmes du premier, second, et même du troisième ordre). Les auteurs remarquèrent également, en essayant de modéliser les stratégies de contrôle des sujets, que si la fonction de transfert de ceux-ci était différente pour chaque système, la forme de la fonction de transfert globale [sujet+système] restait remarquablement stable.

Par conséquent, ces études montre que les opérateurs humains sont capables d'«internaliser» les propriétés dynamiques des objets contrôlés. Dans notre étude, nous nous intéressons plus particulièrement à la contribution de la perception des forces d'interaction entre le bras et l'objet manipulé à ce processus d'internalisation. Nous abordons cette question par la comparaison des performances des sujets pour la tâche considérée en fonction de leur accès à la perception de ces forces.

7.1.3.1 Le retour d'effort modifie la dynamique de l'interaction entre le bras du sujet et l'objet contrôlé

Dans cette étude, la force d'interaction entre le bras du sujet et le système contrôlé est reproduite artificiellement grâce à un manche à balai muni de moteurs et produisant donc un «retour d'effort». Grâce à ce système, le sujet à l'impression subjective d'un contact réel avec un système mécanique élastique. Pour estimer la contribution de la perception de cette force d'interaction à la manipulation de ce système élastique, nous avons comparé les performances de sujets effectuant exactement la même tâche de poursuite avec ou sans retour d'effort. Cependant, la présence ou l'absence du retour d'effort change la dynamique de l'interaction entre le sujet et l'objet contrôlé. Lorsque ce retour d'effort est actif, les forces exercées par le système virtuel sont transmises au manche et interagissent avec les forces produites par le bras du sujet (voir figure 24). Il est par conséquent difficile de séparer

- l'effet du retour d'effort du à l'établissement d'une boucle de rétroaction en force «externe»
- de la contribution de la force réfléchie comme «information haptique» utile à l'internalisation, par les sujets, des propriétés dynamiques de l'objet manipulé.

Une augmentation des performances des sujets peut provenir d'un effet «passif» du retour d'effort, comme par exemple l'amortissement des mouvements du sujet. Cependant, une telle amélioration, d'origine «mécanique», doit apparaître dès les premiers essais exécutés avec retour d'effort contrairement à un effet sur la qualité ou la vitesse d'apprentissage des sujets. Ce second type d'influence, s'il est constaté, indique que le retour d'effort joue un rôle «informatif» dans l'amélioration de la pratique de la tâche, et donc une participation au processus d'internalisation précédemment décrit.

7.1.3.2 Indices prédictifs, délais et anticipation

Le rôle des processus adaptatifs internes dans le contrôle des mouvements, tel qu'il est exprimé dans la littérature, est essentiellement de donner une estimation soit de la commande nécessaire à l'obtention d'un état sensoriel désiré (modèle inverse), soit de prédire la conséquence sensorielle d'une commande motrice particulière (modèle direct). Lors de la tâche de poursuite, quand le système contrôlé réagit aux mouvements des sujets avec un délai temporel important, et quand la trajectoire de la cible est peu prévisible, de tels modèles peuvent perdre leur efficacité: les modèles directs ou inverses donnent une prédiction qui est peu pertinente à

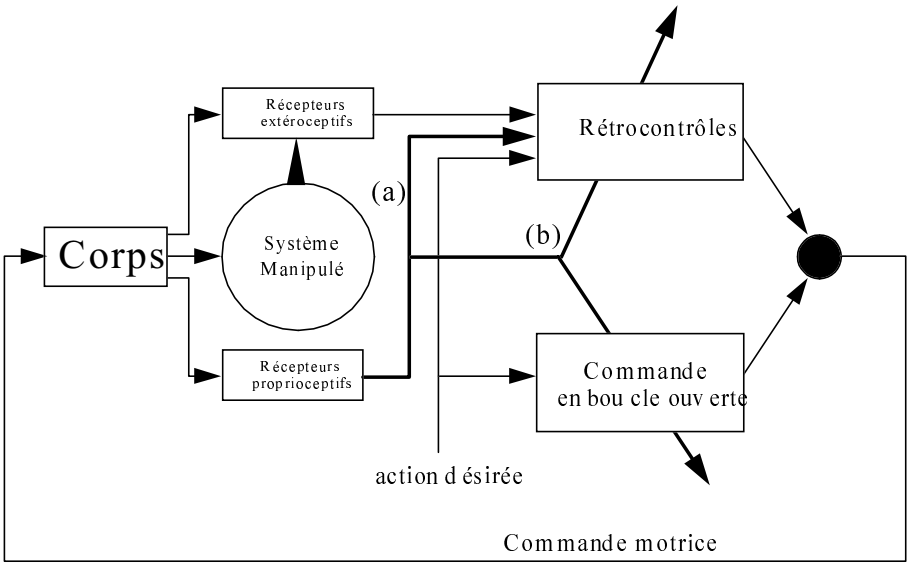

Figure 23. Les informations issues des récepteurs sensoriels intervenant dans la perception haptique peuvent intervenir de deux façons différentes dans le couplage sensori-moteur contrôlant la poursuite. Elles peuvent jouer le rôle de variables contrôlées, impliquées dans des boucles de contre-réaction (voie a)) ou participer à l'élaboration d'un signal d'erreur impliqué dans l'adaptation des paramètres de processus sensori-moteurs internes (voie b)). Ces processus peuvent être, par exemple, des rétrocontrôles dont les gains sont adaptatifs, ou des modules fonctionnant en boucle ouverte, possédant également une plasticité.

l'instant où elle est formulée et qui ne peut être utilisée pour améliorer un contrôle en retour des mouvements. Les performances en poursuite se dégradent ainsi de façon importante lorsqu'un délai est introduit dans le système de rétrocontrôle visuo-manuel [167, Miall et al., 1985] ou lorsque la trajectoire de la cible devient peu prévisible [195, Poulton, 1952] . C'est pourquoi nous suggérons que la présence d'indices aidant à prédire la trajectoire de la cible peut aussi agir sur la capacité des sujets à utiliser ces hypothétiques processus adaptatifs internes adaptés à la dynamique de l'objet manipulé. Nous avons ainsi, dans cette expérience, manipulé plusieurs facteurs permettant d'évaluer l'influence de ces indices prédictifs. La prévisibilité du stimulus visuel a été ainsi contrôlée par son contenu fréquentiel (bruit contenant des fréquences plus ou moins élevées) et par l'utilisation d'un environnement visuel particulier permettant au sujet de connaître à l'avance les déplacements de la cible. D'après notre hypothèse, supposant que la force d'interaction perçue joue un rôle à la fois comme variable contrôlée et comme signal informatif impliqué dans l'apprentissage des propriétés du système manipulé, nous attendons une influence de ces deux facteurs d'anticipation sur le bénéfice apporté par le retour d'effort à la fois en terme de performance moyenne et de capacité d'apprentissage.

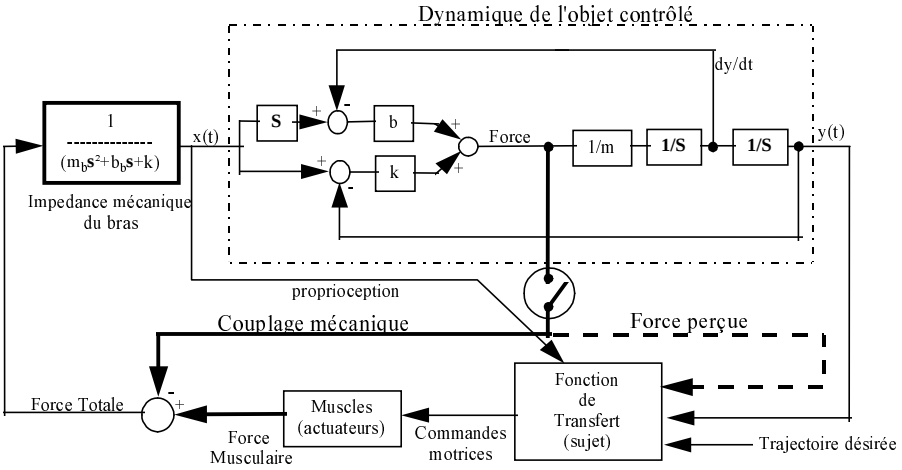

Figure 24. Schema de la tâche incluant un modèle du bras sour forme d'impédance mécanique. Il faut noter que lorsque le retour d'effort est actif (interrupteur central fermé), il introduit deux modifications principales dans ce système bouclé: il a d'abord un effet purement mécanique (flèche en gras) puisque la force générée s'ajoute à la force musculaire exercée par le sujet, mais il a également un effet "informatif". La perception des forces d'interaction entre le manche et le bras est une source d'information supplémentaire pour le sujet, s'ajoutant aux informations d'origine visuelle, le renseignant sur la nature du système qu'il contrôle (flèche en pointillés).

7.2 Dispositif expérimental et Méthodes

7.2.1 Simulation du système mécanique

Le sujet doit contrôler la trajectoire de la sortie d'un système dynamique à un seul degré de liberté. Le système est le même pour tous les sujets et pour toutes les conditions expérimentales. Il est constitué d'une masse (m) liée à un point virtuel (P) par un ressort linéaire et un amortisseur placés en parallèle (figure 25-a). La position et la vitesse du point P sur un axe horizontal correspond aux position et vitesse angulaires du manche à balais. La simulation de l'évolution du système dynamique est effectuée sur un ordinateur à système temps réel (M68030 OS/9) par intégration numérique de l'équation différentielle du second ordre suivante :

$$F(t) = m.\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = k.\left[x(t) - y(t)\right] + b.\left[\frac{\partial x}{\partial t}(t) - \frac{\partial y}{\partial t}(t)\right] \tag{7.66}$$

Avec

- $y(t) =$ position de la masse sur l'axe horizontal,
- $x(t) =$ position du point P sur le même axe,
- $F(t) =$ force exercée par le lien élastique ressort/amortisseur,
- $m =$ masse ($m =$ 0.287 kg),
- $k =$ constante de rigidité du ressort ($k = +$ 0.422 $N.m^{-1}$),
- $b =$ constante de viscosité ($b =$ + 0.051 $N.s.m^{-1}$).

L'algorithme d'intégration numérique utilisé est très simple puisqu'il s'agit de la méthode d'Euler, peu coûteuse en temps de calcul. Le pas d'intégration correspond au pas d'échantillonnage de la carte d'entrée sortie numérique qui acquière les données (position et vitesse, échantillonnées à 75 Hz) des codeurs numériques fixés sur les axes du joystick. Cette méthode d'intégration est ici suffisamment précise: l'emploi de l'algorithme de Runge-Kutta, plus coûteux en temps de calcul mais plus précis, avec un pas d'intégration 100 fois plus faible ne montre que des différences négligeables par rapport à la méthode d'Euler (de l'ordre de 0.1 % de l'amplitude maximale des déplacements de la masse).

7.2.2 Le système de retour d'effort

La position du point P est donc donnée par la position angulaire d'un manche à balais équipé de moteurs (ROBOTOP, Matra Marconi Space). Le manche porte une poignée à l'extrémité d'une tige longue de 15 cm dont l'autre extrémité est soutenue par une platine autorisant des mouvements de rotation autour de deux axes

perpendiculaires situés dans un plan horizontal. L'excursion angulaire maximale est de 25 degrés sur chacun des axes. La poignée se déplace donc sur une surface sphérique pouvant être approximée par un plan. Deux petits moteurs électriques sont connectés à chacun des axes et permettent d'exercer une force sur le bras du sujet tenant la poignée. En effet, des réducteurs harmoniques (50:1) placés sur les axes des deux moteurs permettent de transformer la rotation des moteurs en force. Pour chacun des deux axes, la force exercée au niveau de la poignée du manche est proportionnelle au courant $I(t)$ parcourant le moteur correspondant. L'amplitude maximale de la force que peut exercer un moteur au niveau de la poignée est environ 25 N. Chacun des axes porte également un codeur optique de 100 000 pas par révolution et donnant donc la position angulaire du manche à 0.9 mm près au niveau de la poignée. Nous avons programmé l'ordinateur de façon à ce que la force exercée sur le bras du sujet par un des moteurs reproduise (à un facteur multiplicatif près) la force $F(t)$ exercées par le lien élastique. Le courant $I(t)$ est contrôlé par un servo proportionnel dérivé suivant la loi

$$I(t) = K.\,[P(t) - P_d(t)] + B.\,[V(t) - V_d(t)] \tag{7.67}$$

Avec

- $t =$ temps,
- $I(t)$: courant,
- $P(t)$ et $P_d(t)$: position instantanée et position désirée du manche,
- $V(t)$ et $V_d(t)$: vitesse instantanée et vitesse désirée du manche,
- K : matrice (2 x 2) des gains en position,
- B : matrice (2 x 2) des gains en vitesse.

Les équations (7.66) and (7.67) sont formellement équivalentes. En identifiant les premières composantes de $P_d(t)$ et $V_d(t)$ respectivement à la position et à la vitesse de la masse, et en choisissant des valeurs correctes des gains K et B, on obtient une force exercée proportionnelle à $F(t)$. Une loi de commande similaire a déjà été utilisée pour générer des interactions virtuelles entre la main de sujets et un manipulateur qui n'était pas un manche à balais mais un robot plan [102, Hogan, 1989] . La tâche de poursuite étant monodimensionnelle, seul un des moteur est actif, le second est programmé pour limiter les mouvements dans un plan frontoparallèle au sujet. Le manche comporte également un capteur de force bidimensionnel fixé entre la poignée du joystick et l'extrémité de sa tige. Ce capteur permet de mesurer la force appliquée par les sujets sur le manche. Ce capteur mesure des amplitudes maximales de 40 N, et l'acquisition du signal analogique produit est accomplie par un convertisseur analogue/digital de 12 bits de résolution (XVME540, linéarité 1/2 LSB, précision 0.05 % FSR). La précision théorique de la mesure est de 0.02 N. Mais la précision réelle est limitée

par le bruit du capteur évalué à 0.06 N pic à pic ou 0.02 N R.M.S (1000 échantillons). Les forces sont échantillonnées à la même fréquence que les positions et vitesses du manche (75 Hz). Ce capteur est utile pour deux raisons. Il permet de vérifier que la force produite par les moteurs est effectivement liée de façon linéaire à la force donnée par l'équation (7.66). Ce capteur nous a permis de superposer au contrôleur (7.67) un servocontrôleur en force qui possède deux fonctions. La première est d'éliminer, lorsque le retour d'effort est inactivé, la friction statique due principalement à la présence de réducteurs harmoniques sur les deux axes. L'amplitude maximale de cette friction mesurée au niveau de la poignée (et provenant des réducteurs harmoniques, de la platine mécanique et des moteurs) est toujours inférieure à 2 Newtons. Ce contrôle en force est également utilisé pour améliorer la qualité du retour d'effort lorsque celui-ci est actif. Ce système permet d'obtenir une relation linéaire stable entre la force $F(t)$ et la force $F_m(t)$ mesurée par le capteur de force. La relation entre ces deux grandeurs, mesurée sur tous les essais, est linéaire et stable puisqu'une régression linéaire entre la force désirée et la force obtenue donne un coefficient de régression de 0.976.

7.2.3 Génération des stimuli visuels (trajectoires de la cible)

Le déplacement horizontal de la cible sur l'écran est du type pseudo-aléatoire. La procédure obtenue pour le générer est la suivante. Un spectre d'amplitude et de bande de fréquence limitées a été généré en utilisant un tirage aléatoire uniforme. Une transformée de Fourier inverse donne alors une série temporelle continue. Les trajectoires obtenues ont été ensuite normalisées en amplitude, de façon à ce que l'énergie spectrale soit la même pour toutes les trajectoires. Cette procédure a été utilisée pour générer cinq trajectoires différentes (T1 à TWB). Les spectres de puissances des trajectoires T1 à T4 intéressent des bandes de fréquences contigues. La trajectoire T1 contenant des fréquences plus basses que la trajectoire T4. Le spectre de puissance de la trajectoire TWB (pour «wide band trajectory», trajectoire à large spectre) possède des composantes sur une bande de fréquence qui est la réunion des bandes des trajectoires T1 à T4. Le tableau suivant résume les propriétés spectrales des différents types de stimuli générés:

Stimulus	**Fréquence minimum**	**Fréquence maximale**
T1	(0) 0.0183 Hz	0.0732 Hz
T2	0.0732 Hz	0.1465 Hz
T3	0.1465 Hz	0.2196 Hz
T4	0.2196 Hz	0.293 Hz
TWB	(0)0.0183 Hz	0.293 Hz

Afin d'éviter une brusque transition au début de la poursuite, chaque trajectoire de la cible a été multipliée par une série temporelle sigmoidale $s(t)$, de valeur comprise entre 0 et 1, avec

$$s(i) = 1/\left[1 + e^{-w.(i-i_0)}\right]$$

avec

- $i =$ temps exprimé en numéro de l'échantillon (from 0 to 3796)
- $i_0 =$300.00
- $w =$ 0.033

Il faut souligner le fait que la fréquence naturelle du système mécanique virtuel (0.192 Hz) est très en-dessous de la fréquence naturelle du bras humain estimée entre 1 et 3 Hz [17, Bennett et al., 1992] . En inversant l'équation (7.66), il est possible d'obtenir la trajectoire idéale $x_i(t)$ du joystick permettant un suivi parfait de la cible. Du fait de la linéarité du système, la trajectoire idéale ne comporte aucune composante fréquentielle significative supérieure à 0.3 Hz. Ainsi, les sujets son théoriquement capables de produire cette tajectoire idéale $x_i(t)$. Bien entendu, l'analyse des résultats n'a concerné que la partie de l'enregistrement non affectée par la multiplication par la fonction sigmoidale ($s(i) \sim 1.0$ pour $i >$ 900).

7.2.4 Deux types d'environnement visuel

Les sujets ont été placés dans le noir face à un écran d'ordinateur. Le point P, correspondant à la position angulaire du joystick, n'est jamais figuré sur l'écran. Un petit cercle rouge, correspondant à la position de la masse se déplace sur un axe horizontal situé au milieu de l'écran. Nous avons donné comme consigne au sujet de garder ce petit pointeur au centre d'un pointeur plus grand se déplaçant sur le même axe et figurant la position de la cible. Ces deux pointeurs sont toujours dessinés sur un fond noir. La capacité des sujets à reproduire les mouvements de la cible a été testée dans différentes conditions expérimentales incluant notamment deux types d'environnement visuels (figure 25-b). Le premier comportait uniquement les deux pointeurs décrit précédemment (un cercle rouge et un cercle noir se déplaçant horizontalement). Dans le second type d'environnement figure également une courbe (verte) défilant du haut vers le bas de l'écran. Cette ligne représente la trajectoire de la cible et coupe donc le cercle vert en son centre. Ce dernier environnement visuel permet aux sujet de connaître à l'avance les déplacements de la cible et donc de les anticiper. Le délais entre l'apparition d'un point de cette courbe défilante au sommet de l'écran et le moment où il est dessiné au centre du cercle vert est de 3.27 s. Ceci signifie donc que, dans cette condition expérimentale, les sujets peuvent connaître exactement tous les déplacements de la cible dans les 3.27 secondes à venir. Nous avons appelé cette condition expérimentale la condition «scrolling» («défilement» en anglais). Lorsque la ligne défilante est présente sur l'écran, la poursuite devient de type «précognitive» [162, McRuer et Krendel, 1957] .

7.2.5 Plan expérimental et évaluation des performances

La tâche de poursuite a été proposée aux sujets dans quatre conditions expérimentales différentes résumées dans le tableau suivant:

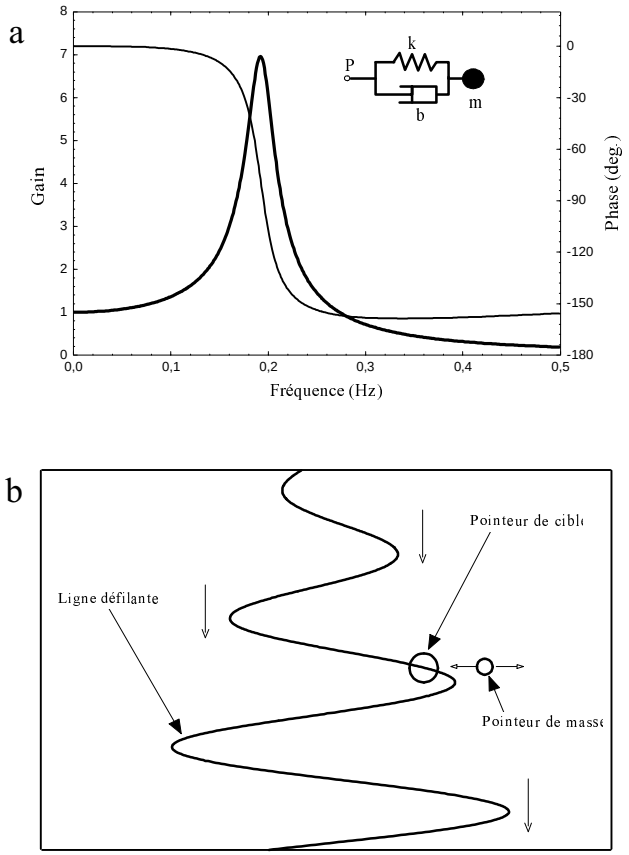

Figure 25. a) Fonction de transfert du système que doivent contrôler les sujets. La courbe de gain est représentée en traits épais. Le petit schéma montr un équivalent mécanique du système utilisé: une masse dont le mouvement est imprimé par un lien élastique constitué d'un ressort et un amortisseur placés en parallèle. b) Environnement visuel présenté aux sujets. Le petit cercle et le grand cercle donnent respectivement la position de la masse et la position de la cible et se déplacent uniquement sur un axe horizontal. Dans la condition "scrolling", une courbe défilante est ajoutée à cet environnement et donne à l'avance au sujet les déplacements de la cible.

Session	Retour d'effort	Défilement
"00"	non	non
"F0"	oui	non
"0S"	non	oui
"FS"	oui	oui

Les six sujets (masculins) agés de 22 à 27 ans ont effectués la tâche dans les quatre conditions expérimentales décrites ci-dessus, avec un intervalle de plusieurs jours entre deux sessions. La succession des différentes conditions expérimentales est différente pour chaque sujet. Par exemple, la séquence [0S, FS, 00, F0] a été affectée au premier sujet et la séquence [F0, 00, 0S,FS] au second. Chaque session comporte six présentations de six séquences différentes des cinq trajectoires (T2 T3 T4 T1 TWB, puis T4 TWB T3 T2 T1 etc...). Cependant, cet ordre est exactement le même pour toutes les sessions et pour tous les sujets. Une courte pause (5 minutes) est accordée au milieu de chaque session. Nous n'avons donné aucune indication au sujet, ni à propos de la nature du système qu'il doit contrôler, ni à propos de la statégie motrice qu'il doit employer.

L'évaluation des performances s'est faite par le calcul d'un score E_i, en l'occurrence une transformation logarithmique de l'erreur quadratique moyenne définie par la relation

$$E_i = -Log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{i=n}\left[T_i(t) - y(t)\right]^2\right)$$

- E_i : score (erreur) pour le $i^{ème}$ essai,
- $T_i(t)$: position de la cible au temps t,
- $y(t)$: position de la masse au temps t.

Il faut noter que ce score correspond à une mesure de performance: un score faible indique une poursuite peu précise.

L'utilisation d'une transformation logarithmique permet d'obtenir, à partir des erreurs quadratiques moyennes dont la distribution est proche d'une distribution en χ^2, une distribution des scores proche de la loi normale [232, Snedecor et Cochran, 1989] . L'utilisation d'une telle transformation est basée sur l'hypothèse que les erreurs instantanées de poursuite $e(t)$ sont distribuées normalement. Bien que l'analyse de variance soit peu sensible aux déviations des distributions par rapport à la normalité [143, Lindman, 1974] , nous avons vérifié que les distributions de $e(t)$ et des E_i n'étaient pas trop éloignées d'une distribution normale. Contrairement à la distribution des scores (figure 26-b), la plupart des 720 distributions de l'erreur instantanée diffèrent significativement d'une distribution normale (test de Kolmogorov-Smirnoff), mais sans doute à cause d'une légère assymétrie dans le profil de la distribution (figure 26-a). Cependant, les distributions obtenues sont suffisamment proches d'une distribution normale pour qu'il soit possible de les comparer par une analyse de variance.

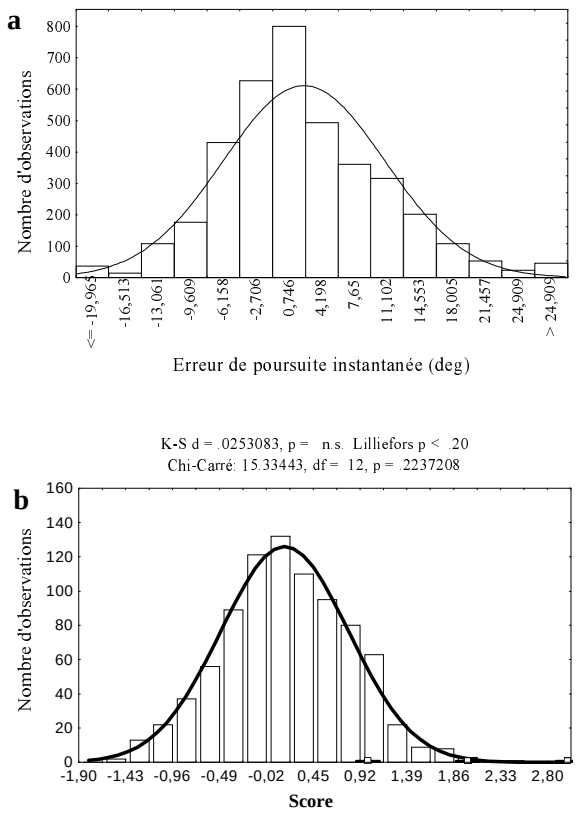

Figure 26. a) Exemple de distibution de l'erreur de poursuite instantanée $e(t)$ pour une épreuve particulière. Cette distribution diffère d'une distribution normale en raison d'une légère assymétrie. b) distribution des scores E_i obtenus. Cette distribution ne diffère pas significativement d'une distribution normale.

Nous avons ainsi utilisé pour quantifier la significativité statistique des différences observées sur la qualité de la poursuite dans les différentes conditions expérimentales une analyse de variance à plusieurs facteurs (analyse «within-subjects»).

7.2.6 Méthodes statistiques

Nous avons obtenu une banque de données comportant 6*4*5*6=720 scores. Nous avons donc procédé à l'analyse statistique en trois étapes. Dan la première étape, nous avons étudié l'influence de la pratique sur le score obtenu. Un point crucial est de déterminer si l'effet de la pratique est notable à l'interieur d'une session (facteur «TRIAL», à six niveaux) et entre deux sessions (facteur «SESSION» à six niveaux). En effet, si l'apprentissage perdure d'une session à l'autre, il est difficile de séparer cet effet de l'effet des facteurs déterminant les condition expérimentales (retour d'effort et environnement visuel). Lors de la seconde étape, nous avons étudié plus particulièrement l'influence de différents facteurs sur le niveau de performance des

sujets:

- l'influence du type de stimulus visuel employé, c'est à dire l'influence du contenu fréquentiel de la trajectoire de la cible (facteur TARGET à quatre niveaux),
- l'influence de l'environnement visuel, c'est à dire de la présence de la ligne défilante permettant aux sujets d'anticiper sur la trajectoire de la cible (facteur SCROLLING à deux niveaux),
- l'influence de la présence du retour d'effort (facteur FFBCK à deux niveaux).

Une analyse de variance a été systématiquement appliquée aux résultats obtenus pour la trajectoire TWB. Cette analyse peut en effet nous permettre de voir si l'influence des facteurs SCROLLING et FFBCK pour ce stimulus est la même que l'influence «moyenne» observée sur les autres trajectoires. La réponse a cette question peut être négative si, par exemple, la présence de hautes fréquences dans la stimulation visuelle est un facteur limitant sévèrement la réussite de la tâche. Une dernière étape de l'analyse a été consacrée à l'analyse de l'effet des facteurs «retour d'effort» et «défilement» sur l'apprentissage du contrôle de notre système dynamique. Le tableau suivant résume les trois étapes de l'analyse statistique conduite:

Analyse	**Facteurs principaux**	**Remarque**
1	BW, SESSION, TRIAL	
2	BW, FFBCK, SCROLLING	(trois derniers essais seulement)
3	BW, FFBCK, SCROLLING, TRIAL	
4	BW, FFBCK, SCROLLING, PRACTICE	

7.3 Résultats

7.3.1 Influence de la pratique sur l'évolution du score

Nous avons étudié, lors d'une première analyse, l'influence des facteurs SESSION et TRIAL pour les stimuli T1 à T4 et séparément pour le stimulus TWB. Les résultats de l'ANOVA montrent une influence très significative des facteurs TRIAL et BW (respectivement $F[5,25]=8.822$, $p<0.0001$ et $F[3,15]$, $p<0.745$). Le facteur SESSION ne présente pas d'influence significative ($F[3,15]=0.436$). Les résultats sont similaires pour la trajectoire TWB puisque seul le facteur TRIAL a une influence significative sur le score ($F[5,25]=3.361$, $p<0.018$). Ceci nous permet de suggérer que les sujets ne transfèrent pas ou très peu leur pratique de la tâche d'une session à une autre, et qu'il est par conséquent légitime d'étudier l'influence des conditions expérimentales sur ce score, indépendamment de leur ordre de présentation. Afin d'étudier cette influence, nous avons donc remplacé dans la suite de l'étude, le facteur SESSION (à quatre niveaux) par deux facteurs à deux niveaux: les facteurs FFBCK et SCROLLING.

Cette étude est séparée en deux parties:

- l'analyse de l'influence des conditions expérimentales sur le niveau de performance final des sujets (en ne considérant que les trois derniers essais d'une session).
- l'analyse des effets combinés de la pratique et des conditions expérimentales sur l'évolution des scores à travers l'influence du facteur TRIAL et de la comparaison des scores moyens obtenus lors des trois premiers essais d'une part, et lors des trois derniers d'autre part.

7.3.2 Influence des conditions expérimentales sur le niveau de performance final

Une analyse de variance restreinte aux trois derniers essais de chaque session ne montre aucune influence significative de la pratique (via le facteur TRIAL). Nous avons donc considéré que les performances des sujets étaient stabilisées à la fin de la session et que nous pouvions supprimer ce facteur. Pour les stimuli T1 à T4, les trois facteurs principaux BW, SCROLLING et FFBCK sont significatifs (respectivement $F[3,15]=72.37$, $p<0.00001$; $F[1,5]=10.04$, $p<0.0248$ et $F[1,5]=12.69$, $p<0.0162$). Les résultats montrent également la présence d'une interaction significative entre les facteurs BW et FFBCK ($F[3,15]=8.62$, $p<0.0014$). Pour la trajectoire «large bande» TWB, le facteur principal SCROLLING est significatif ($F[1,5]=18.77$, $p<0.0748$) contrairement au facteur FFBCK ($F[1,5]=6.63$, $p<0.064$). Toujours pour ce stimulus, nous avons également trouvé une intéressante interaction significative entre les facteurs FFBCK et SCROLLING ($F[1,5]=13.61$, $p< 0.014$). Essayons maintenant de détailler la signification de ces résultats.

7.3.2.1 La contribution du retour d'effort

Pour les stimulus T1 à T4, la présence du retour d'effort améliore globalement le score des sujets. Les scores sont en moyenne meilleurs lorsque le retour d'effort fonctionne (figure 27). Les interactions entre les différents facteurs ne sont pas significatives exceptée celle concernant l'interaction entre le facteur BW (contenu fréquentiel des stimuli) et FFBCK. Ce résultat important indique que l'influence du retour d'effort dépend des fréquences présentes dans la stimulation visuelle. Un test de Scheffé montre que le retour d'effort augmente significativement le score final des sujets seulement pour les trajectoires «basse fréquence» (T1 et T2, figure 27).

Comme nous l'avons précisé précédemment, le stimulus TWB comporte toutes les composantes fréquentielles présentes dans les trajectoires T1 à T4. Mais il est possible que le score obtenu dépende de façon «non linéaire» du contenu fréquentiel de la stimulation. En d'autres termes, il est possible que par exemple la présence de fréquences basses modifie le traitement, par le système nerveux central, des composantes fréquentielles de fréquences plus élevées. Pour étudier la pertinence de cette hypothèse, nous avons comparé, dans les quatre conditions expérimentales, le score moyen obtenu avec la trajectoire TWB avec le score moyen calculé sur la population des scores obtenus avec les trajectoires T1, T2, T3 et T4. Les résultats de t-tests montre que cette

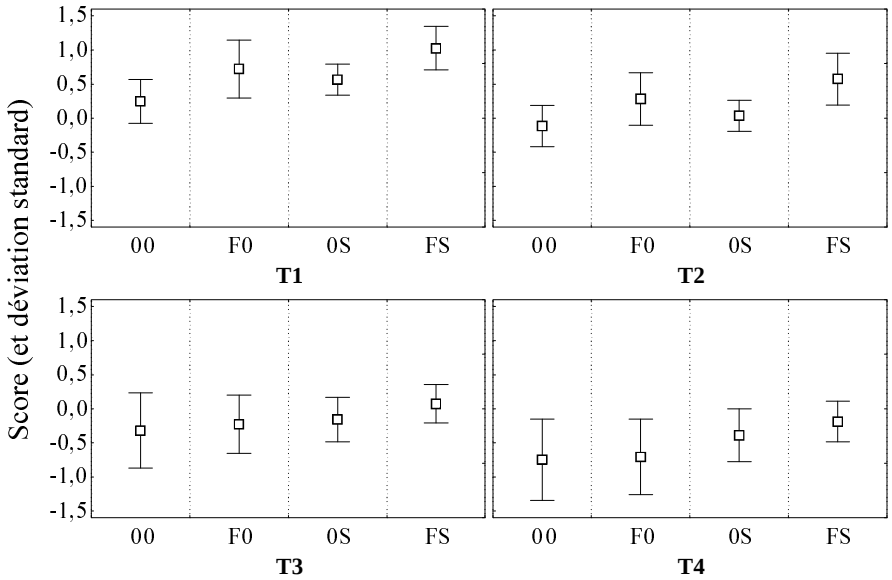

Figure 27. Influence des différentes conditions expérimentales sur le score moyen obtenu pour les trajectoires T1, T2, T3 et T4. Les quatres étiquettes placées en abscisse représente les quatres conditions expérimentales: (00) indique les essais sans retour d'effort et sans indice prédictif, (F0) avec retour d'effort sans indice prédictif, (0S) sans retour d'effort avec indice prédictif et (FS) avec retour d'effort et avec indice prédictif.

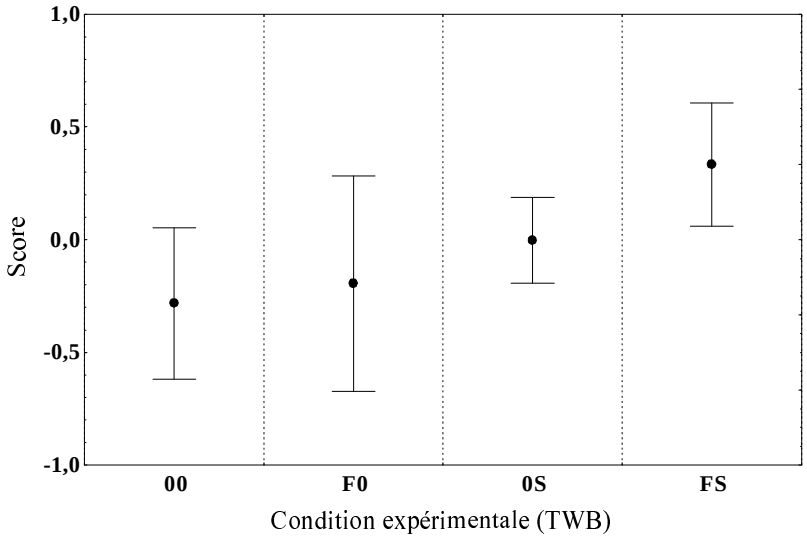

Figure 28. Influence des conditions expérimentales sur le score moyen obtenu pour les trois derniers essais (pour la trajectoire "large bande" TWB).

différence n'est jamais significative, quelque soit la condition expérimentale considérée.

condition	t	tlim
00	0,319	1,96
F0	1,747	1,96
0S	0,085	1,96
FS	0,176	1,96

7.3.2.2 Influence de la prédictabilité de la trajectoire de la cible

Les performances des sujets sont clairement influencées par la distribution des fréquences temporelles utilisée pour produire les trajectoires de stimulation comme le montre l'effet significatif du facteur BW. Plus la stimulation comporte de hautes fréquences, plus la tâche semble difficile pour les sujets. Cet effet peut s'expliquer facilement: le décalage de phase du système mécanique virtuel (donné par sa fonction de transfert, voir figure 25-a) augmente avec la fréquence des mouvements et donc avec la fréquence de stimulation. Ainsi, le système masse-ressort obéit aux mouvements du bras du sujet avec un retard plus important pour la trajectoire T4 que pour la trajectoire T1. Pour compenser ce délai, le sujet doit anticiper la trajectoire de la cible et tenter de la prévoir. Cette anticipation est difficile lorsque le cercle représentant la cible bouge rapidement et de façon imprévisible. C'est pourquoi la présence d'un indice prédictif (la ligne défilante) a permis d'aider les sujets à annuler en partie l'effet de ce retard. Les scores obtenus lorsque cet indice prédictif est présent sur l'écran sont par conséquent bien meilleurs.

7.3.2.3 Effet combiné du retour d'effort et des indices prédictifs

Nous avons trouvé une interaction significative entre le facteur FFBCK et le facteur SCROLLING pour la trajectoire TWB (figure 28). Le score moyen obtenu dans la condition FS est significativement différent de celui obtenu dans la condition 0S (Scheffé Test, $p<0.00494$) alors que les scores moyens obtenus dans les conditions 00 et F0 ne diffèrent pas de façon significative. Ainsi, pour la trajectoire TWB, le retour d'effort n'apporte un bénéfice substantiel aux sujets que s'il est accompagné de l'indice prédictif (figure 28). Cette interdépendance apparaît également, mais seulement comme une tendance, pour les trajectoires T3 et T4 (figure 27). Ainsi, lorsque la stimulation visuelle comporte des hautes fréquences, **la perception des forces d'interaction ne semble améliorer efficacement le contrôle visuo-manuel que lorsque les sujets peuvent anticiper la trajectoire de la cible** .

7.3.3 Influences combinées du retour d'effort et de la pratique

Nous avons précédemment constaté que l'effet du facteur SESSION, destiné à l'étude d'une éventuelle influence de la pratique perdurant d'une session à l'autre, n'était pas significatif contrairement à celui du facteur TRIAL. Il nous est donc possible d'étudier l'influence des conditions expérimentales et en particulier celle du retour d'effort sur l'évolution des scores essai après essai. Une analyse de variance conduite sur les trajectoires

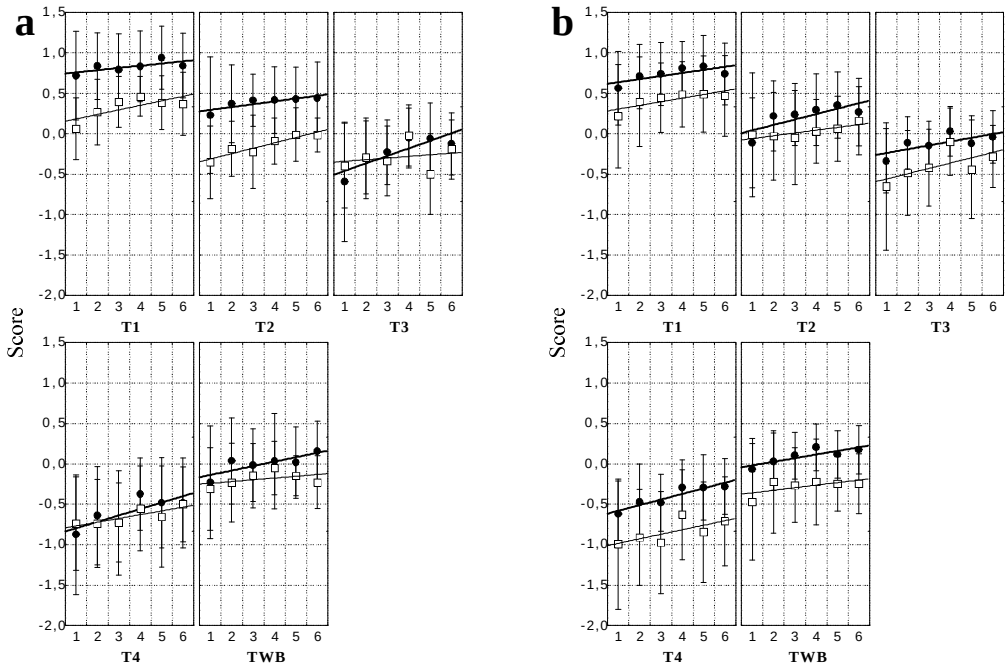

Figure 29. a) Influence de l'application du retour d'effort (facteur principal FFBCK) sur l'évolution des scores avec la pratique (facteur TRIAL). Les moyennes figurées par des ronds pleins correspondent aux épreuves accomplies alors que le retour d'effort est actif. b) Influence de la présence de l'indice prédictif (facteur principal SCROLLING) sur l'évolution des scores avec la pratique (facteur TRIAL). Les moyennes figurées par des ronds pleins correspondent à des épreuves effectuées avec un environnement visuel comportant la ligne défilante permettant l'anticipation des mouvements de la cible. Les droites de régression, données à titre indicatif permettent de quantifier la vitesse d'apprentissage moyenne (correspondant à leur pente).

T1 à T4 et prenant en compte les facteurs BW, SCROLLING, FFBCK et TRIAL donne les résultats suivants:

- Les facteurs principaux BW et TRIAL ont une influence très significative (respectivement F[3,15]=128,44, p<0,00001 et F[5,25]=8,82, p<0.000063).
- Comme dans l'analyse précédente, nous trouvons une interaction significative entre les facteurs BW et FFBCK (F[3,15]=27,94, p<00001). Il est donc clair que même si l'on prend en compte les effets de pratique de la tâche, la contribution du retour d'effort dépend fortement du contenu fréquentiel de la stimulation.
- Cette analyse met de plus en évidence la haute significativité de l'interaction entre les facteurs BW, FFBCK et TRIAL (F[15,75]=3,356, p<0.000254). Ce résultat apporte une précision tout à fait intéressante concernant les capacités d'apprentissage des sujets: celles-ci dépendent à la fois du contenu fréquentiel de la stimulation et de la présence du retour d'effort.

Afin de simplifier la discussion concernant ce dernier résultat, nous avons remplacé le facteur TRIAL (à 6 niveaux) par un facteur PRACTICE (à deux niveaux). L'introduction de ce facteur nous permet en effet d'étudier spécifiquement la «quantité d'apprentissage» des sujets au cours d'une session. Ce facteur indique pour chaque score, s'il a été obtenu lors de la première partie de la session (épreuves 1 à 3) ou lors de la dernière partie (épreuves 4 à 6). L'analyse proposée revient ainsi à comparer le score moyen obtenu lors des trois premiers essais d'une session à celui obtenu lors des trois derniers.

Toujours pour les trajectoires T1 à T4, nous avons retrouvé des résultats analogues à ceux obtenus avec le facteur TRIAL:

- Les facteurs principaux BW et PRACTICE ont un effet significatif (respectivement F[3,15]=128,44, p<0.00001 et F[1,5]=20,41, p<0.0063).
- L'interaction BWxFFBCK reste significative (F[3,15]=27,94, p<0.00001).
- L'interaction du troisième ordre BWxFFBCKxPRACTICE est elle aussi significative (F[3,15]=6,5, p<0.005).

Pour illustrer la signification de cette interaction du troisième ordre, nous avons représenté sur la figure 30 la différence entre le score moyen obtenu lors des trois premiers et trois dernier essais (en fonction des différents types de stimulation et de la présence ou non d'un retour d'effort). La hauteur de chaque barre permet ainsi de quantifier l'apprentissage des sujets au cours de la session. On peut observer que le retour d'effort augmente cette quantité pour les stimuli «haute fréquence» T3 et T4, et au contraire la diminue pour les stimuli «basse fréquence» T1 et T2. Un test de Scheffé montre d'ailleurs que l'augmentation de performance (entre les trois premiers et trois derniers essais) n'est significative que pour les trajectoires T3 et T4 et uniquement lorsque le

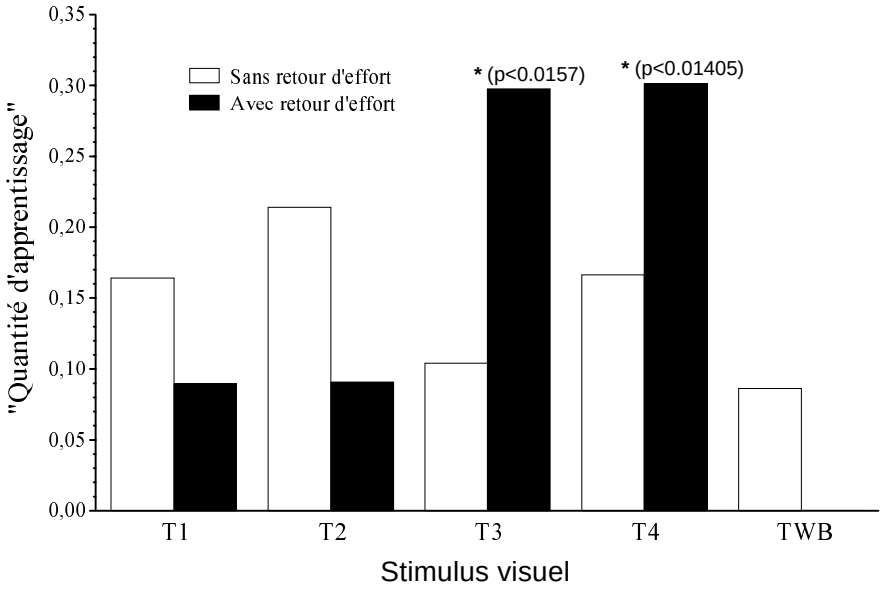

Figure 30. Illustration de l'influence combinée des facteurs PRACTICE, FFBCK et BW sur la «quantité d'apprentissage» associée à une condition expérimentale. Les colonnes blanches correspondent aux épreuves effectuées sans retour d'effort alors que les colonnes pleines indiquent un résultat obtenu lorsque le retour d'effort est actif. La hauteur de chaque colonne représente la différence entre le score moyen obtenu lors des trois premiers essais et le score moyen obtenu lors des trois derniers essais.

retour d'effort est actif (respectivement $p<0{,}0157$ pour T3 et $p<0{,}01405$ pour T4). Pour les stimulations à basse fréquence (T1 et T2), le bénéfice apporté par le retour d'effort apparaît dès les premiers essais (figure 29) et la pratique n'améliore que faiblement les performances des sujets. Cependant, la faiblesse de cette amélioration est peut-être due à un plafonnement de la qualité de la poursuite car dans cette condition expérimentale, les sujets présentent d'excellentes performances sans doute difficiles à améliorer.

La présence d'un indice prédictif (la ligne défilante) augmente sensiblement la qualité de la poursuite dans toutes les conditions et pour toutes les trajectoires. Mais ce facteur ne semble pas avoir d'effet sur la capacité d'apprentissage des sujets. Nous n'avons en effet pas trouvé d'interaction significative entre les facteurs SCROLLING et FFBCK.

7.4 Discussion

Les résultats obtenus lors de cette expérience permettent de discuter la contribution de la perception des forces d'interaction à la manipulation d'un système dynamique générique. Nous avons en effet constaté que le retour de force améliorait globalement le contrôle de la trajectoire du système manipulé. Mais ces résultats montrent également que ce bénéfice dépenddu contenu fréquentiel de la stimulation utilisée. Pour les trajectoires contenant des «basses» fréquences (T1 et T2), ce bénéfice est important et apparaît dès les premiers essais. Ce n'est pas le cas pour les stimuli T3 et T4:

- Il n'y a pas de bénéfice immédiat apporté par le retour d'effort.
- Sa contribution à l'augmentation du niveau de performance final n'est significative que lorsque l'environnement visuel permet au sujet d'anticiper la trajectoire de la cible (c'est particulièrement vrai pour la trajectoire TWB).
- Le retour d'effort semble plutôt permettre, pour ces deux types de trajectoires, une augmentation significative des capacités d'apprentissage des sujets. Si les résultats obtenus en début de session ne sont pas différents de ceux obtenus sans retour d'effort, les sujets «apprennent plus» avec le retour d'effort, obtenant un niveau final en moyenne plus élevé.

Ces deux derniers résultats, discutés plus loin, suggèrent que la perception des forces d'interaction permet au SNC de mieux adapter sa stratégie de contrôle (les caractéristiques de processus adaptatifs internes) aux paramètres de la dynamique du système manipulé. Il faut cependant noter que l'activation d'un retour d'effort modifie la dynamique de l'interaction entre le bras du sujet et le système virtuel. Avant d'essayer d'expliquer les résultats obtenus en considérant le rôle informatif du retour de force, ne peut-on pas supposer un effet purement mécanique de l'établissement de la boucle de force ? Les effets sur le score moyen induits par la conjugaison du retour d'effort et de la pratique ou de l'apport d'un indice prédictif ne peuvent s'expliquer par un effet de ce

type. De plus, les forces maximales appliquées par les moteur (<6N) sont bien faibles devant la force distale que le bras des sujets est capable de développer. En d'autres termes, les sujets sont tout à fait capables de déplacer leur bras à leur aise lorsque le retour d'effort fonctionne et peuvent donc en principe conserver un contrôle positionnel plutôt qu'un contrôle de la force qu'ils exercent.

7.4.1 Influence de la prédictabilité de la trajectoire de la cible

Les résultats de cette étude montrent que la présence du retour d'effort augmente de façon globale la qualité du contrôle. Cependant, nous avons montré que cet effet dépendait fortement du contenu fréquentiel de la stimulation et de la richesse des informations visuelles fournies au sujet. Le bénéfice apporté par le retour d'effort semble notablement réduit lorsque les sujets doivent reproduire un mouvement de la cible contenant des hautes fréquences (au delà de la fréquence naturelle du système). D'autre part, la présence de la ligne défilante semble aider à l'utilisation des informations haptiques, même et surtout pour les stimulations à fréquence élevée. Ces deux effets semblent liés à la capacité du sujet à anticiper les déplacement de la cible: lorsque la trajectoire de celle-ci contient des hautes fréquences, il est plus difficile de prédire ses mouvements. Cette anticipation est grandement facilitée lorsque l'on donne au sujet directement la trajectoire future de la cible en affichant la ligne défilante. Nous proposons que ces résultats puissent s'expliquer par le fait que les informations concernant la force d'interaction perçue sont plus facile à utiliser lorsque la tâche est clairement définie dans le futur.

Le rôle de la prédictabilité de la trajectoire de la cible lors de tâches de poursuite visuo-manuelles a été étudiée de manière extensive par le passé. Il est clair que la qualité de la poursuite est toujours meilleure lorsque la trajectoire de la cible est prévisible ([2, Adams, 1961]). La poursuite d'une cible animée d'un mouvement sinusoidal (et donc très périodique) est ainsi plus facile que la poursuite de cibles donc la trajectoire comporte des harmoniques multiples (mélange de sinusoïdes). En effet, les sujets semblent capables de préparer à l'avance leur geste ce qui leur permet de diminuer leur temps de réaction et par conséquent le déphasage temporel entre la trajectoire demandée et la trajectoire qu'ils produisent réellement. Ainsi, lors de la poursuite visuo-manuelle d'une cible évoluant à vitesse constante mais changeant de façon aléatoire d'un essai à l'autre, la vitesse initiale du bras est largement indépendante de la vitesse de déplacement de la cible. Ce n'est pas le cas lorsque cette vitesse est prévisible ([55, Van Donkelaar et al., 1992]). De façon analogue, des sujets connaissant à l'avance le poids d'un objet qu'il doivent agripper et soulever utilisent cette connaissance pour anticiper les forces nécessaires à la réalisation de cette tâche ([70, Forssberg et al., 1992]). Poulton ([195, Poulton, 1952]) fait une distinction entre ce qu'il appelle l'anticipation du recepteur («receptor anticipation») (capacité de l'opérateur à utiliser un signal préparatoire qui lui est fourni) et l'anticipation perceptuelle («perceptual anticipation»= capacité de l'opérateur à prédire les mouvements futurs de la cible). Il est clair que ces deux composantes sont induites par nos conditions expérimentales:

- l'anticipation du récepteur existe lorsque la cible défilante est présente sur l'écran,
- l'anticipation perceptuelle intervient plus particulièrement lorsque cette ligne est absente.

Le bénéfice apporté par le retour d'effort est plus faible pour les stimuli visuels comportant des hautes fréquences. Cette observation peut trouver une explication assez simple en invoquant le fait que les informations sensorielles corrélées à la force d'interaction parviennent au système nerveux central avec un délai temporel assez important: elles doivent pour cela «voyager» le long des nerfs périphériques et traverser les circuits spinaux. Dans le cadre d'une tâche de saisie, les réponses réflexes induites par un changement du poids de l'objet induisent une changement dans la force exercée par le sujet seulement après 60 à 90 ms ([48, Cole et Abbs, 1988] [109, Johansson et Westling, 1984]). La faible prédictabilité des mouvements de la cible ne permet pas à l'opérateur de préparer à l'avance sa commande motrice. Lorsque les mouvements de la cible sont rapides, les informations concernant la force perçue peuvent parvenir au système nerveux central alors qu'elles sont déjà «obsolètes» pour la préparation de la commande motrice adéquate et peuvent même perturber cette préparation. Cette hypothèse semble être soutenue par quelques données neurophysiologiques: des neurones de l'aire 4 du cortex des primates, impliquées dans le contrôle des mouvements, ont un profil de décharge fortement corrélé avec la force exercée lors de mouvements lents, alors qu'ils déchargent très faiblement lorsque le même mouvement est accompli plus rapidement ([44, Cheney et Fetz, 1980]). Plusieurs études expérimentales suggèrent de plus que le traitement des information concernant les forces sont traitées avec une forte latence lors de mouvements contraints. Ainsi, un appareil similaire au manche à retour d'effort utilisé dans cette expérience a été employé pour mesurer la force exercée par des sujets lors d'une tâche de suivi d'une surface ([160, McIntyre et al., 1995]). Les sujets devaient, lors de cette étude, faire glisser le manche le long d'un «mur» rigide (et virtuel). A l'insu des sujets, l'orientation du mur était changée à chaque nouvel essai alors que l'image qui leur était projetée restait la même. L'enregistrement de la force exercée par les sujet lorsqu'ils étaient ainsi «trompés» montre que la force d'interaction est corrélée avec le changement d'orientation du mur. Autement dit, les sujets ne percoivent pas le conflit et contrôlent leur bras comme un système compliant programmé «en boucle ouverte»[33]. Cependant l'intensité de la force exercée sur le mur semble augmenter de façon importante vers la fin du suivi. Cette observation semble indiquer l'existence d'une latence importante entre le début du mouvement et l'instant ou le conflit (c'est à dire la perception d'une force d'interaction anormalement élevée) est perçu par le système nerveux central. Une autre expérience conduit à la même conclusion: il est demandé aux sujets de maintenir entre le pouce et l'index un manipulandum actif qui exerce, de façon imprévisble, une force tirant sur la pince du sujet ([108, Johansson et al., 1992]) avec un profil «en rampe». Les enregistrement de la force de saisie montre que la première réponse motrice apparaît seulement 140 ms après l'activation du manipulandum. Cependant l'existence d'une telle latence ne

[33] La commande est, dans cette interprétation, une commande en position exprimée dans un repère visuel, le bras se comportant comme un ressort passif. Ce modèle s'inspire du modèle "du point d'équilibre".

peut expliquer l'ensemble des résultats que nous avons obtenus, et en particulier ceux montrant une interaction entre l'application du retour d'effort et l'augmentation des performances des sujets avec leur pratique de la tâche. C'est pourquoi nous proposons ensuite d'élargir le cadre de la discussion au rôle des informations haptiques dans l'adaptation des processus moteurs aux caractéristiques dynamiques du système contrôlé.

7.4.2 Rôle de la perception des forces d'interaction dans l'adaptation des transformations sensori-motrices dynamiques

Même si nous ne pouvons exclure totalement de ces résultats l'influence d'un effet purement mécanique du retour d'effort, la cohérence globale de nos observations nous permet de soutenir deux hypothèses principales concernant le rôle de la perception des forces dans la génération d'une commande motrice adaptée.

- La perception des forces d'interaction peut d'abord permettre une meilleure estimation des variables «signifiantes» impliquées dans la tâche de contrôle. Si cette variable est par exemple l'accélération de la masse contrôlée, son estimation ne peut être obtenue qu'à partir de données sensorielles visuelles en l'absence du retour d'effort. Lorsque celui-ci est actif, cette estimation visuelle peut être précisée par la donnée de la force d'interaction qui lui est directement proportionnelle. Cette première hypothèse correspond à l'attribution de la fonction de variables contrôlées aux signaux sensoriels corrélés à la force d'interaction.
- Mais les informations sensorielles concernant les forces d'interaction peuvent être impliquées dans l'estimation, non pas de certaines variables, mais des caractéristiques dynamiques du système contrôlé (inertie, rigidité du ressort, viscosité). Dans la cadre de cette seconde hypothèse, ces caractéristiques sont intégrées par l'adaptation de transformations sensorimotrices (modèle interne, modèle direct ou adaptation de gains dans la boucle de perception-action). Cette seconde hypothèse (qui n'exclue pas la première) est soutenue par quelques observations expérimentales: plusieurs études ont par exemple montré que des sujets étaient capables d'estimer le moment d'inertie d'une tige qu'ils tiennent immobile dans la main ou qu'ils agitent avec le bras[103, Hoisington, 1920] [235, Solomon et al., 1989] [41, Chan, 1994] [42, Chan, 1996] .

Nous proposons en particulier qu'une partie de la commande motrice soit produite en «boucle ouverte» et que le retour d'effort joue une rôle dans la genèse de cette composante:

- La trajectoire de la cible pour les stimuli basse fréquence est assez prévisible. Or c'est pour ce type de trajectoire que nous avons observé une contribution immédiate et importante du retour d'effort. Cette adaptation rapide peut s'expliquer soit par un effet purement mécanique, soit par une modification de la compliance du bras (par une adaptation des gains des réflexes par exemple, [131, Lacquaniti et al., 1992]

) permettant de tirer avantage du retour d'effort. Mais cette première stratégie ne peut être employée avec succès pour les stimuli haute fréquence. En effet, cette boucle de retour est perturbée par le délai de réaction du système manipulé. C'est pourquoi nous suggérons qu'une composante en «boucle ouverte» soit impliquée dans la tâche. Celle-ci permet d'anticiper sur les mouvements de la cible, malgré ce délai, a condition que ceux-ci soient prévisibles. Or, même si cette composante joue un rôle lors de la présentation des stimuli T3 et T4, elle ne peut être que de faible utilité sans l'ajout de l'indice prédictif à l'environnement visuel. Lorsque cet indice est présent, alors la commande en boucle ouverte est réellement efficace et peut être encore plus précise si le retour d'effort est actif. Cette hypothèse peut expliquer:

1. que pour la trajectoire TWB, la présence de la ligne défilante rende significative la contribution du retour d'effort (cette tendance est présente pour les stimuli T3 et T4).
2. que d'autre part la stimulation des récepteurs sensoriels par la force d'interaction augmente les capacités adaptatives des sujets en permettant un ajustement plus précis du processus responsable de la génération de la commande en boucle ouverte.

Dans ce dernier cas, le bénéfice en terme de qualité de l'apprentissage n'est visible que pour les trajectoires «haute fréquence». En effet, comme nous l'avons vu précédemment c'est avec ce type de stimulation que la composante en boucle ouverte joue un grand rôle dans la réussite du contrôle.

Finalement, cette dernière hypothèse nous permet de donner un cohérence globale à nos observations. Les résultats obtenus avec cette expérience montrent, d'un point de vue concret, qu'il peut être important, pour un opérateur responsable du contrôle d'un système dynamique (voiture, avion ou outil complexe), d'avoir un accès sensoriel aux forces d'interaction. Par exemple, les avions les plus récents sont construits avec des commandes électriques empêchant le pilote de sentir les conséquences de ses mouvements sur la structure mécanique de l'avion. Dans les cockpits insonorisés, le pilotage est ainsi uniquement basé sur des informations visuelles. Si la stratégie de pilotage fait appel à un schéma sensorimoteur interne acquis par apprentissage, le manque d'information peu réduire la qualité du schéma ou peut ralentir l'apprentissage. Cette question est aussi cruciale en ce qui concerne les systèmes de téléopération. La téléopération permet d'utiliser des manipulateurs robotisés pour intervenir en environnement hostile tel que l'espace, les sites radioactifs, les profondeurs sous-marines et les champs de bataille. Bien que l'utilité du retour d'effort en téléopération soit depuis longtemps reconnue, les résultats de cette étude montre que que celui-ci permet d'obtenir un contrôle plus précis, même pour des mouvements rapides, lorsque la tâche est clairement définie «dans le futur». Cet apport est sans doute du à l'intervention de processus sensorimoteurs adaptatifs permettant une «internalisation» des propriétés dynamiques du système contrôlé. Outre les aspects comportementaux et physiologiques discutés dans cette section, ce travail fournit des précisions pratiques concernant l'utilité de l'implémentation du retour d'effort

pouvant être étendues à d'autres systèmes autre que le système générique utilisé ici.

Dans cette étude, nous ne nous sommes intéressés qu'au niveau de performance des sujets et à sa dépendance par rapport aux conditions expérimentales. Mais le dispositif utilisé permet d'enregistrer et de conserver sous forme de séries temporelles tous les mouvements produits par les sujets ainsi que les mesures du capteur de force et les déplacements de la cible. Nous avons donc la possibilité d'étudier en détail le déroulement temporel de chaque essai et en particulier la ou les stratégies choisies par les sujets pour manipuler et apprendre à manipuler l'objet dynamique. La modélisation de la stratégie de contrôle des sujets est justement l'objet du chapitre suivant. Nous nous proposons donc maintenant de cerner les grandes caractéristiques des stratégies employées dans cette tâche de poursuite un peu particulière. Nous chercherons d'autre part à proposer un modèle comportemental aussi simple que possible expliquant et reproduisant au mieux le comportement des sujets. Nous accorderons évidemment une place particulière à la discussion de l'existence, de la nature et de la contribution des «modèles internes de la dynamique» susceptibles d'intervenir dans le processus sensorimoteur adaptatif étudié ici.

Chapitre 8
Stabilité du contrôle et apprentissage: l'hypothèse des surfaces glissantes

8.1 Introduction

8.1.1 Les tâches de poursuite visuo-manuelles : un paradigme expérimental adapté à la modélisation du couplage perception/action

Les tâches de poursuite visuo-motrices ont été très utilisées pour la modélisation du comportement de sujets humains impliqués dans une tâche de contrôle visuo-moteur continue. Dans ces études, l'individu est vu comme une «boite noire» recevant des informations visuelles contrôlées, comme la position de la cible et la position du bras ou bien seulement l'erreur entre ces deux positions[34]. Il produit un signal de sortie unique résultant de l'action du bras sur un manipulandum (la plupart du temps un manche à balais). Seul un petit nombre d'entrées sensorielles et de sorties motrices sont impliquées dans cette tâche qui peut être accomplie avec succès par des systèmes autonomes simples tels que peuvent en proposer la robotique et l'automatique. Cependant, même si cette approche a produit des modèles intéressants, elle n'a pas apporté d'explication complète et satisfaisante du comportement des opérateurs humains impliqués dans ce type de tâche. Deux caractéristiques principales de ce comportement sont responsable de ces difficultés de modélisation: la présence de **caractéristiques non linéaires** importantes et **l'aspect intermittent** de la commande.

8.1.2 Caractéristiques générales de la commande produite par les sujets

8.1.2.1 Intermittence

La trajectoire du bras produite pendant la poursuite d'une cible suivant une trajectoire «douce» tend à être

[34] Paradigme de poursuite particulier désigné en anglais par le terme «compensatory tracking».

discontinue et comporte une succession de mouvements «en escalier» intermittents («Step-and-Hold Mouvements», SAHM). Plusieurs types de mécanismes ont été proposés pour expliquer ce aspect intermittent [168, Miall et al., 1993] . Toutes ces hypothèses supposent que le sujet utilise les retours sensoriels. Une première hypothèse suggère que l'erreur de poursuite soit perçue à travers un mécanisme d'échantillonnage qui autorise seulement des corrections intermittentes, synchronisées avec une horloge interne hypothétique (Bekey 1962, [50, Craik, 1947] . Mais cette hypothèse est infirmée par le fait que la fréquence des mouvements de correction n'est pas constante (à moins de considérer que cette horloge centrale est bruitée ou couplée à un processus d'estimation de l'erreur). D'autres études invoquent l'existence d'une période réfractaire comme source principale d'intermittence dans le contrôle [50, Craik, 1947] . Une dernière hypothèse suppose qu'une morte-zone («dead zone») dans la perception de l'erreur de poursuite empêche les sujets de déclencher un mouvement de correction pour de petites erreurs (Navas and Stark, 1968) [264, Wolpert et al., 1992] . Finalement, l'origine de l'intermittence observée dans ces tâches de poursuite reste jusqu'à maintenant obscure et vue principalement comme une conséquence de contraintes internes d'origine neurophysiologique. Dans cette étude, nous suggérons que l'intermittence possède un rôle fonctionnel dans la stratégie de contrôle de sujets: celui de maintenir la stabilité du contrôle malgré les imprécisions concernant les propriétés dynamiques des segments articulés du corps ou des objets manipulés.

8.1.2.2 Les modèles linéaires du comportement de l'opérateur

Une approche différente a été introduite dans des domaines de recherches plus appliqués comme la Téléopération ou l'interface Homme-machine. Ces travaux sont motivés par le désir de comprendre le comportement humain observé lors de la conduite de systèmes dynamiques complexes que sont les voitures, les avions ou les systèmes d'artillerie articulés (tourelles). De nombreuses équipes ont abordé ce problème en le réduisant à une tâche de poursuite: un modèle simplifié de la dynamique du système considéré est inséré entre le manipulandum et un pointeur figuré sur un oscilloscope ou un écran d'ordinateur. Ce pointeur représente l'état du système controllé après action de la commande produite par l'opérateur. Par conséquent, pour poursuivre de manière satisfaisante la cible figurée sur l'écran avec ce pointeur, l'opérateur doit prendre en compte la dynamique inconnue de l'objet manipulé. Les sujets sont capables d'adapter leur stratégie de contrôle à des dynamiques variées [163, McRuer et al., 1966] [201, Repperger et al., 1995] [222, Shadmehr et al., 1993] . La coopération entre ingénieurs et physiologistes a permis de proposer des interprétations théoriques des stratégies de contrôle des opérateurs utilisant le formalisme de la théorie du contrôle des systèmes linéaires ou de la théorie du contrôle optimal [209, Rouse, 1980] [227, Sheridan et Ferrell,1974] . Plusieurs études ont montré que le comportement de l'opérateur peut être partiellement modélisé à l'aides de fonctions de transfert linéaires. Par exemple, le modèle «crossover» [161, McRuer, 1980] suppose que les sujets adaptent leur fonction de transfert de façon à contraindre la fonction de transfert en boucle ouverte globale (la boîte «Homme+Système») à garder une forme fixe quel que soit la dynamique insérée dans la boucle de contrôle. Cependant, le succès de cette modélisa-

tion en terme de système linéaire a été limité par la part importante, dans la commande produite, des action non linéairement corrélées à la fonction de forçage (trajectoire de la cible). En d'autres termes, le spectre de puissance de la trajectoire du manche à balai comporte des composantes significatives pour des fréquences absentes de la stimulation visuelle. Nous proposons que cette composante non linéaire du contrôle correspond, au moins partiellement, à des pics de fréquence introduits par les mouvements correctifs responsables de l'aspect intermittent de la commande.

8.1.2.3 L'hypothèse de la «variable glissante»

Il existe de nombreuses sources de non linéarités dans la dynamique des membres (elasticité musculaire, hystéresis, friction et viscosité dans les articulations, couplage de type Coriolis). Quand un sujet doit accomplir un mouvement en présence de contraintes mécaniques externes ou manipuler un objet donné, certaines caractéristiques dynamiques du système résultant ne sont pas «connues» du système nerveux central. Un point clé dans l'étude du contrôle moteur est de comprendre comment le cerveau peut générer ou apprendre à génerer une commande appropriée. Cette question se pose de la même façon dans le domaine de la Robotique lorsque l'on doit construire un contrôleur de bras articulé complexe (de dynamique difficile à modéliser) permettant de garantir la stabilité du contrôle.

Un tel problème peut se simplifier par l'introduction de «variables glissantes» intermédiaires. Une variable glissante est une combinaison spécifique de l'erreur instantanée et de ses dérivées temporelles successives. (c'est un cas particulier de variable composite). En choisissant cette combinaison de manière à ce que l'équation différentielle implicite qu'elle définie soit stable, des problèmes d'ordre élevé peuvent être réduit à des problèmes du premier ordre (Annexe B), ce qui permet d'utiliser des stratégies de contrôle en boucle fermée très simples. De plus, une unique variable composite permet de coder un vecteur d'état de dimension arbitraire [230, Slotine et Li, 1991] . Les variables glissantes peuvent être vues soit comme une prédiction concernant l'évolution de l'erreur ou comme un critère supposé être minimisé par un algorithme adapté à la dynamique du système à contrôler. Pour minimiser ce critère, l'algorithme de contrôle peut utiliser à la fois processus en boucle fermée et processus en boucle ouverte. Par exemple, un contrôleur proportionnel-dérivée est un processus fonctionnant purement en boucle fermée qui minimise une variable composite correspondant à une combinaison linéaire de l'erreur et de sa dérivée première. Mais des contrôleurs plus efficaces ont été proposé sous la forme d'un arrangement de composants en boucles fermées et en boucles ouvertes: la partie «boucle ouverte» produit une estimation de la dynamique inverse du système contrôlé alors que la partie «boucle fermée» compense pour les erreurs issues des incertitudes concernant cette estimation.

Il est clair que l'utilisation de prédiction de l'erreur et la combinaison d'éléments de commande en boucle ouverte et en boucle fermée sont des propriétés marquantes mises en evidence dans de nombreuses études concernant le contrôle moteur. Nous avons testé ici une hypothèse supposant qu'une variable composite liée à

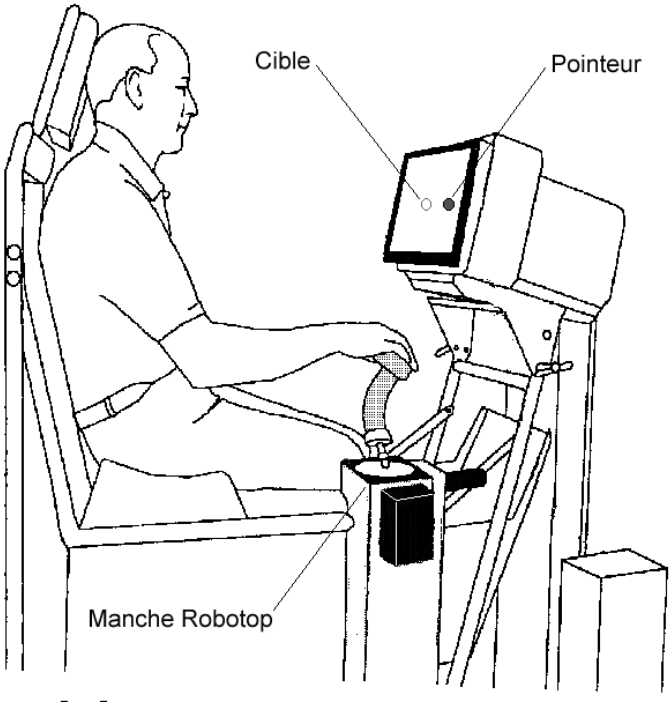

Figure 31. Système de contention intégrant le manche à retour d'effort Robotop.

l'erreur de poursuite était minimisée par nos sujets grâce à une telle combinaison de contrôle en boucle ouverte et boucle fermée. Les phases de mouvements rapides observées dans la trajectoire du bras et montrant un profil stéréotypé semblent appartenir à la partie «boucle ouverte» du schéma de contrôle. Alors que leur déroulement temporel ne semble pas dépendre des retours sensoriels, nous proposons que ces mouvements intermittents soit initiés lorsque la valeur absolue de cette variable composite dépasse un seuil suposé constant. D'après la théorie du contrôle par surfaces glissantes [230, Slotine et Li, 1991] , la direction de ces mouvements de correction doit dépendre du signe de cette variable glissante (annexe B).

8.1.3 Démarche expérimentale

Dans cette étude, nous avons demandé aux sujets de contrôler un système dynamique à l'aide d'un manche à balais de façon à accomplir une tâche de poursuite de cible (voir figure 32-a). Comme d'autres études l'ont montré, nous avons observé dans la trajectoire du manche des mouvements intermittents «en escalier». L'analyse des séries temporelles enregistrées nous a permis

- de montrer que le comportement des sujets introduit une composante non linéaire significative qui empêche une interprétation de la stratégie observée uniquement en termes linéaires,
- de tester, à l'aide d'une analyse spectrale comparative, si ces mouvements intermittents pouvaient être à l'origine des non-linéarités observées,

- de montrer que la cinématique de ces mouvements intermittents était stéréotypée et de suggérer qu'ils étaient produits en «boucle ouverte» par le système nerveux central qui ne semble programmer que leur amplitude (ou leur durée) et l'instant de leur déclenchement.
- de tester l'hypothèse que ces mouvements correctifs puissent être déclenchés par une variable glissante comme c'est le cas en robotique pour le contrôle par surfaces glissantes.
- d'identifier les paramètres des variables composites, paramètres qui sont en accord avec les conditions théoriques de stabilité de ces variables,
- de trouver une valeur physiologiquement plausible du temps de réaction (supposé constant) introduisant un délai dans la boucle de contrôle.

8.2 Dispositif expérimental et méthodes

8.2.1 Une tâche de poursuite modifiée

Nos 6 sujets, agés de 22 à 27 ans, ont été assis (dans un système de contention, voir figure 31) devant un écran d'ordinateur figurant une cible (un cercle vert) se déplaçant de façon continue sur un axe horizontal. Nous leur avons demandé de suivre ce pointeur avec un autre pointeur (un rond rouge plus petit) correspondant à la sortie $x(t)$ d'un système dynamique du second ordre à un seul degré de liberté. La dynamique de ce système est décrite par l'équation différentielle suivante:

$$m.x''(t) = -k.[x(t) - u(t)] - b.[x'(t) - u'(t)] \tag{8.68}$$

avec $m = 170g$, $k = 0.25$ N.m^{-1} and $b = 0.03$ N.s.m^{-1}. Ce système, dont l'équivalent mécanique est un système masse/ressort/amortisseur répond ainsi à la position $u(t)$ et à la vitesse $u'(t)$ de déplacement d'un manche à balai motorisé (ROBOTOP Matra Marconi Space). Quatre trajectoires de cibles (T1 à T4) ont été produites en utilisant des distributions spectrales aléatoires adjacentes: 0.0 Hz à 0.074 Hz pour T1, 0.074 Hz à 0.147 Hz pour T2, 0.147 Hz à 0.221 Hz pour T3 et 0.221 Hz à 0.294 Hz pour T4. Mais nous avons également fabriqué une trajectoire (T5) dont la distribution de fréquence recouvre la bande [0.-0.294] Hz entièrement (voir figure 32-b). Chaque épreuve, qui dure 52 secondes, a été présentée 30 fois dans un ordre aléatoire à chaque sujet.

La position angulaire du joystick et sa vitesse instantanée ont été échantillonnées à 75 Hz. L'accélération, utilisée seulement pour l'analyse de la cinématique de la trajectoire du manche, a été obtenue en différentiant la vitesse instantanée et en filtrant celle-ci avec un filtre passe-bas (de fréquence de coupure égale à 10 Hz). Les moteurs électriques connectés à chaque axe permettent d'obtenir un retour d'effort,c'est à dire de reproduire sur

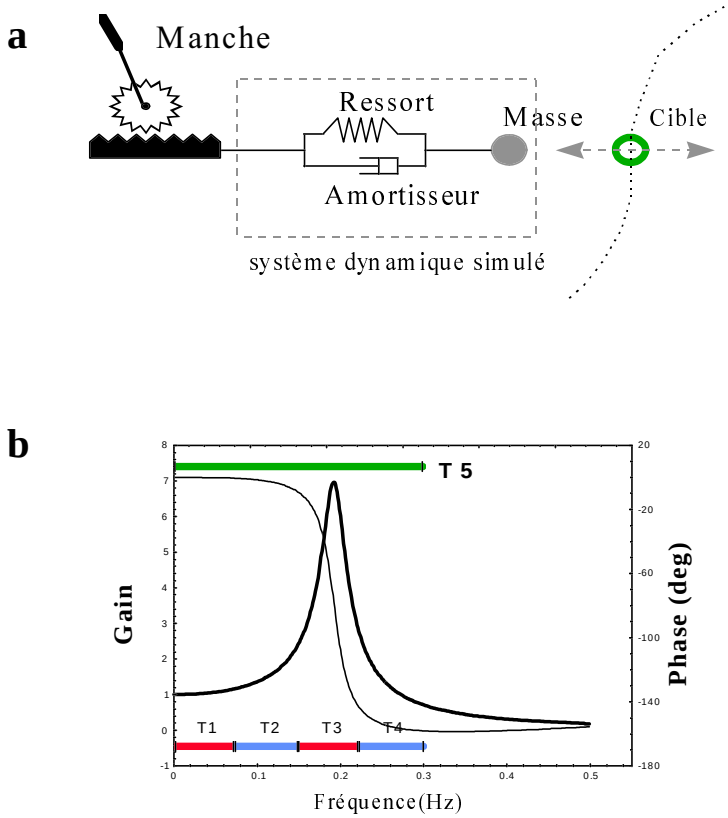

Figure 32. Description de la tâche. (a) Illustration schématique de la tâche à accomplir. (b) Fonction de transfert du système simulé avec indication des bandes de fréquence occupées par les stimulations visuelles.

le bras du sujet la force $F(t) = m.x"(t)$ exercée par le système masse/ressort/amortisseur simulé (voir [160, McIntyre et al., 1995] pour une description plus complète du manche robotisé). Chaque session expérimentale a été accomplie avec ou sans ce retour d'effort.

8.2.2 Les mouvements intermittents «en escalier»

La présence de mouvements de ce type est une caractéristique marquée des enregistrement des trajectoires du manche (figure 33-a). Nous avons extrait ces phases de mouvement particulières des enregistrements de $u(t)$ en utilisant les spécifications suivante: ce sont des phases de mouvements possédant un seul pic de vitesse séparées par des périodes où le manche ne bouge presque pas. Un échantillon particulier appartient à une période d'immobilité si la valeur absolue de sa vitesse et de son accélération sont respectivement inférieures à 5 $deg.s^{-1}$ et 50 $deg.s^{-2}$. Une méthode similaire de segmentation des trajectoires a été utilisée dans [167, Miall et al., 1985] . Nous avons également retenu pour chaque mouvement appartenant à ces phases son amplitude, sa durée, et la valeur maximale observée de la vitesse du manche (VMAX).

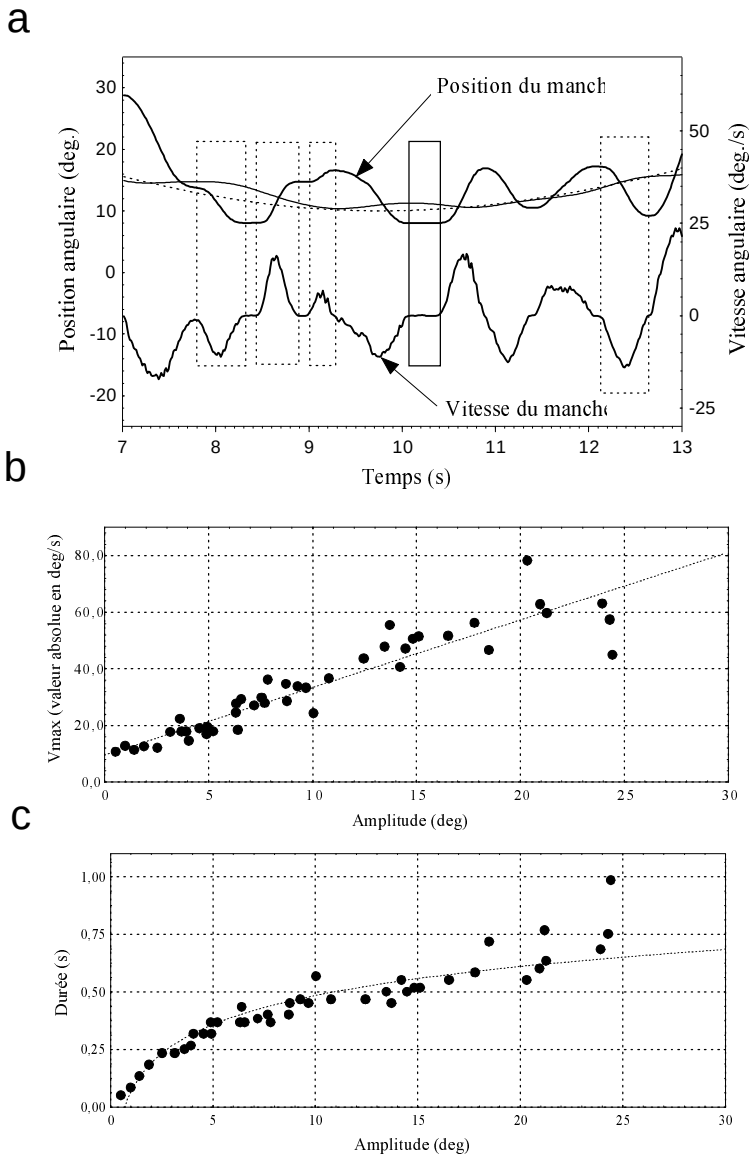

Figure 33. **(a)** Echantillon d'un essai montrant l'occurrence de période de mouvement à caractère stéréotypé (cadre en pointillés) pour la position du joystick (ligne en gras du haut, échelle de gauche) et sa vitesse (ligne en gras du bas, échelle de droite). Les trajectoires de la cible (ligne en pointillés du haut, échelle de gauche) et de la sortie du système mécanique (ligne fine, échelle de gauche) sont aussi figurées. **(b)** Vitesse maximale (Vmax) en fonction de l'amplitude des mouvements en escalier pour un essai particulier (la droite de régression est également figurée). **(c)** Durée du mouvement en fonction de son amplitude (et approximation logarithmique de cette relation, même essai).

8.2.3 Analyse dans le domaine des fréquences

Nous avons employé une analyse spectrale pour tenter de décrire le comportement de nos sujets sous la forme d'une fonction de transfert linéaire. La procédure d'identification de cette fonction a été appliquée à deux modèles linéaires simples (et fonctionnellement équivalents, figure 34-a et 34-b). Le premier (OLM) est un servocontrôleur classique fonctionnant en boucle ouverte. Les sujets sont supposés produire une trajectoire du manche $u(t)$ uniquement à partir de la connaissance de la trajectoire passée et de la position présente de la cible. Le second modèle (CLM), fonctionnant en boucle fermée, ne prend en compte que l'erreur de poursuite $e(t) = c(t) - x(t)$. Les fonctions de transfert H_{OLM} et H_{CLM} correspondant respectivement aux modèles en boucle ouverte et fermée sont définie par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} H_{OLM}(f) &= U(f)/C(f) \\ H_{CLM}(f) &= U(f)/E(f) \end{aligned}$$

où f représente la fréquence (exprimée en Hz) et $U(f)$, $C(f)$ et $E(f)$ sont les valeurs complexes obtenues respectivement par la transformée de Fourier de la trajectoire du manche $u(t)$, la trajectoire de la cible $c(t)$, et l'erreur de poursuite $e(t)$. D'après cette définition des modèles, les fonctions de transfert H_{OLM} et H_{CLM} ne sont définies que pour les fréquences correspondant à des valeurs complexes non nulles de $C(f)$ et de $E(f)$ respectivement. En l'absence de tout bruit dans ce schéma de contrôle, on doit s'attendre donc à ne trouver aucune composante spectrale sognificative pour des valeurs de fréquence supérieures à 0.294 Hz. Cependant, il est bien établit que dans de telles tâche de poursuite impliquant le contrôle d'un système dynamique, les sujets introduisent un bruit de large bande $N(f)$ dans la boucle sensorimotrice (appellé «remnant», dans la terminologie de l'interaction Homme-machine). Les caractéristiques de ce bruit nous sont à priori inconnues, mais nous avons supposé qu'il se combine de manière additive avec la sortie de la fonction de transfert modélisant l'opérateur (figure 34-a et 34-b). Par conséquent, nos estimations $\widehat{H}_{OLM}$ et $\widehat{H}_{CLM}$ des fonctions de transfert H_{OLM} et H_{CLM} sont

$$\begin{aligned} \widehat{H}_{OLM}(f) &= \left[\overline{U}(f) + N(f)\right]/C(f) = H_{OLM} + N(f)/C(f) \\ \widehat{H}_{CLM}(f) &= \left[\overline{U}(f) + N(f)\right]/E(f) = H_{CLM} + N(f)/E(f) \end{aligned} \tag{8.69}$$

où $\overline{U}(f)$ est la transformée de Fourier de la sortie (non mesurable) de H_{OLM} ou de H_{CLM}. Les spectres de U, C et de E ont été obtenus à partir de chaque essai grâce à une transformée de Fourier adaptée aux séries temporelles à valeurs réelles. Cette analyse de fréquence ne peut fournir de bonne estimation de H_{OLM} et de

H_{CLM} pour une fréquence donnée f seulement si $N(f)$ possède une amplitude faible et n'est pas corrélé avec les entrées $C(f)$ ou $E(f)$.

8.2.4 Identification des variables composites

Dans le cadre de la théorie du contrôle des systèmes dynamiques par surfaces glissantes, un mouvement correctif intermittent est supposé être exécuté à un temps t_0, après un temps de réaction δ inconnu mais supposé constant, quand la valeur absolue d'une variable composite $s(t)$ dépasse un seuil lui aussi constant (figure 34-c). Nous proposons dans ce paragraphe une méthode permettant d'identifier les coefficients et le seuil de cette variable. D'après notre hypothèse, la direction du mouvement déclenché doit dépendre du signe de $s(t)$ et l'erreur de poursuite et ses dérivées temporelles doivent être liées, à l'instant précis ou le moment se déclenche, par une relation du type

$$e''(t_0 - \delta) = a.e(t_0 - \delta) + b.e'(t_0 - \delta) + c \tag{8.70}$$

Le signe de c doit être différent pour les mouvement de la droite vers la gauche ou de la gauche vers la droite. Par conséquent, les sujets sont supposés générer un mouvement correctif lorsque le vecteur d'erreur 3D $E(t_0-\delta) = [e(t_0-\delta), e'(t_0-\delta), e''(t_0-\delta)]$ dépasse les limites de la région comprise entre deux plans parallèles. Les paramètres de l'équation (8.70) et le plan de régression ont été calculés, pour des temps de réaction δ de 0 à 500 ms, avec une version «biplanaire» de la régression linéaire multiple (annexe C). L'équation précédente montre qu'un des principes fondamentaux du contrôle par surfaces glissantes est de minimiser (de borner) une seule variable $s(t)$ plutôt que chacune des composantes du vecteur d'erreur de poursuite. Cependant, l'équation différentielle (8.70) doit être stable pour garantir que le fait de borner $s(t)$ implique forcément que l'erreur de poursuite $e(t)$ elle aussi soit bornée (annexe B). La stabilité d'une variable composite peut être facilement déterminée en réécrivant l'équation (8.70) sous la forme

$$e''(t_0 - \delta) + 2.\zeta.\varpi.e'(t_0 - \delta) + \varpi^2.e(t_0 - \delta) = c \tag{8.71}$$

où ϖ (rad/s) est la fréquence naturelle de la variable composite et ζ son coefficient d'amortissement. Une condition **nécessaire et suffisante** pour que la variable composite $s(t)$ soit une variable glissante valide est $\zeta > 0$.

8.3 Resultats

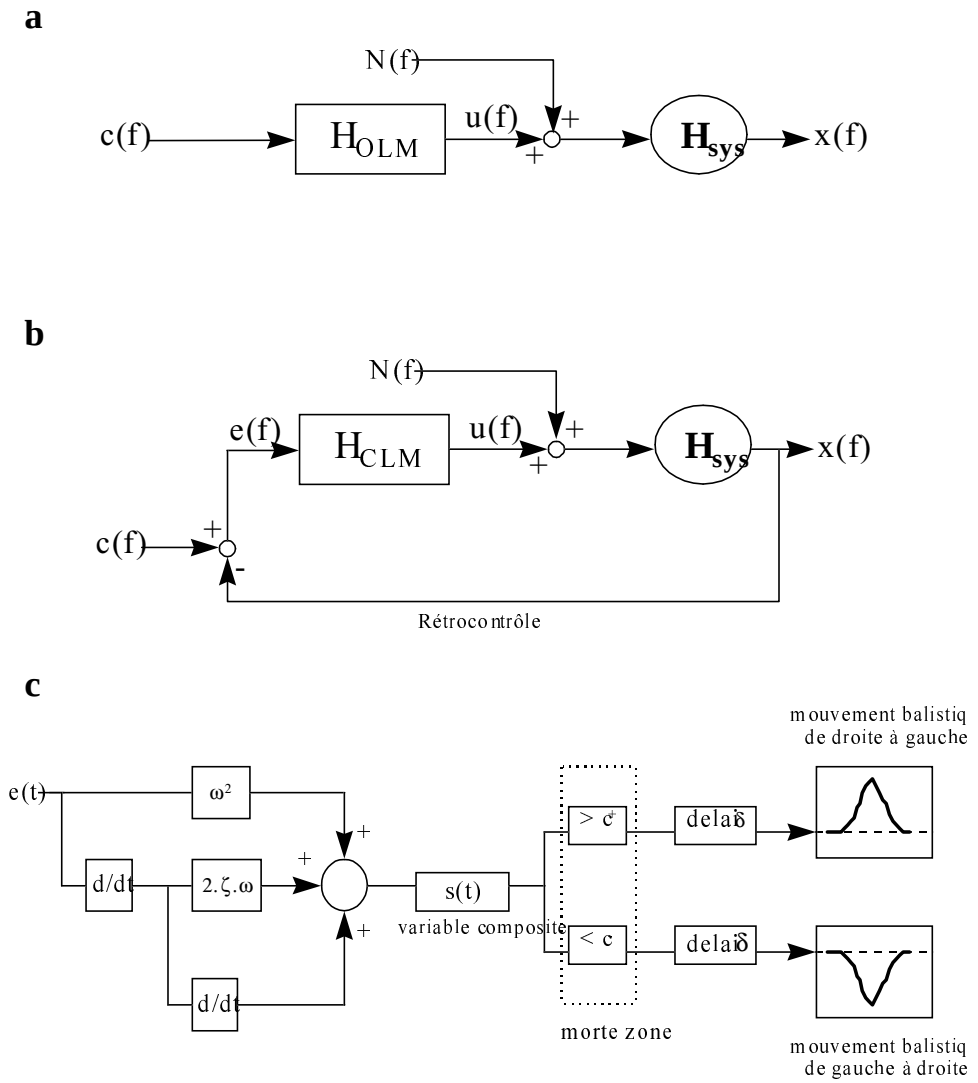

Figure 34. Les trois modèles du contrôle visuomanuel envisagés dans cette étude. **(a)** modèle linéaire en boucle ouverte. **(b)** modèle linéaire en boucle fermée. **(c)** modèle de contrôle d'une variable composite.

8.3.1 Caractéristiques cinématiques des mouvements «en échelon»

La cinématique des mouvements «en échelon» est caractérisée, nous l'avons vu, par la présence d'un seul pic dans le profil de vitesse qui présente une allure «en cloche». Nous avons trouvé une relation quasi-linéaire entre l'amplitude et la vitesse maximale (VMAX) des mouvements et une relation de type logarithmique entre leur amplitude et leur durée (figure 33-b et 33c). Ces caractéristiques montrent que ces mouvements appartiennent à un stéréotype déjà décrit non seulement pour des mouvements de pointage et de saisie d'objet (voir [191, Plamondon, 1995] , pour une revue) mais aussi pour des mouvements concernant d'autres segments corporels comme les saccades oculaires [12, Bahill et al., 1975] [204, Robinson, 1964] . On rencontre également cette stéréotypie dans des tâches impliquant le contrôle de la force appliquée plutôt que celui de la position d'un membre. Ainsi, le profil temporel initial des forces de serrage et de soulèvement durant un mouvement de saisie d'objet comporte également un seul pic de vitesse et une allure «en cloche» [69, Forssberg et al., 1991] .

Ces observations suggèrent fortement une programmation en boucle ouverte de ces phases de mouvement par le système nerveux central car leur déroulement temporel, une fois initié, ne dépend plus de la trajectoire de la cible ou de l'erreur de poursuite.

8.3.2 Identification des modèles linéaires du comportement des sujets

Les trajectoires de cibles utilisées dans cette expérience ne contiennent pas de composantes de fréquences supérieures à 0.294 Hz. Cependant, on trouve dans le spectre de puissance de la trajectoire du manche des composantes fréquentielles significatives au delà de cette limite supérieure. Nous avons appelé cette partie du spectre la «composante haute fréquence» (HFC, le terme «haute fréquence» s'entend relativement à la limite supérieure de la stimulation visuelle). La HFC représente une très grande part de la puissance totale mesurée dans le signal issu du manche (figure 35-haut). Il est possible que cette composante provienne soit

- de bruit dans la mesure de la position du manche,
- d'un bruit dans la commande motrice produite par le système nerveux central qui se reflète dans la trajectoire du bras (sous la forme d'un tremblement physiologique par exemple).

La première possibilité peut être facilement rejetée car même si les codeurs optiques introduisent un bruit de quantification dans les données, il est d'amplitude limitée et affecte surtout les très hautes fréquences (supérieures à 10 Hz). Bien que la seconde hypothèse ne puisse être entièrement rejetée (et soit discutée plus loin), nous suggérons que la HFC soit plutôt due à la présence de ces mouvements stéréotypés d'allure balistique detectés dans la trajectoire de la main. Pour estimer la contribution des mouvements intermittents à la composante haute fréquence, nous avons comparé le spectre de puissance de la vitesse de la main (pour tous

les sujets, et pour la trajectoire T5) au spectre de puissance moyen des séries temporelles originales amputées des phases de mouvement reconnues comme non stéréotypées. Ces derniers signaux ont été obtenus en remplaçant simplement les données ne faisant pas partie de ces mouvements particuliers par une valeur de vitesse nulle. Pour $f > 0.5$ Hz, un tracé des puissances moyennes de la courbe de vitesse des mouvements stéréotypés en fonction des puissances moyennes mesurées à partir des données originales montre une corrélation très forte entre les deux spectres (Trajectoire T5, $R = 0.97$, figure 35-bas). Ces résultats suggèrent fortement que la composante non linéaire de la commande est en grande partie due à la présence des mouvements intermittents «en échelon» dans la commande produite par les sujets.

Indépendamment de la comparaison précédente entre la composante haute fréquence et le spectre de puissance des mouvements stéréotypés, nous avons également analysé le comportement des sujets dans le cadre de la théorie du contrôle des systèmes linéaires. Dans ce cadre, nous avons considéré a priori la HFC comme du bruit introduit dans la commande, bruit supposé indépendant des entrées des modules linéaires OLM et CLM. Il est nécessaire, d'un point de vue théorique, que l'inverse de la fonction de transfert de l'opérateur soit très proche de la fonction de transfert du système contrôlé pour que le schéma de contrôle en boucle ouverte fonctionne. Un tracé de la fonction de transfert inverse moyenne $\widehat{H}_{OLM}^{-1}$ obtenue pour tous les sujets (et pour la trajectoire T5) montre que H_{sys} est en moyenne assez proche de $\widehat{H}_{OLM}^{-1}$ (figure 36-a et 36-b). Nous avons choisi de quantifier la ressemblance entre ces deux fonctions en utilisant la mesure d'erreur (racine carrée de l'erreur quadratique)

$$E_{OLM} = \sqrt{\frac{1}{n_f} \sum_{f=1}^{f=n_f} \left\| \widehat{H}_{OLM}^{-1}(f) - H_{sys}(f) \right\|^2}$$

où n_f est le nombre de fréquences mesurables dans l'intervalle [0-0.3 Hz]. Pour donner une signification plus concrète à cet indice de dissemblance, nous l'avons exprimé comme un pourcentage de l'amplitude maximale du gain de $H_{sys}(f)$. Les mesures d'erreurs obtenues, comprise entre 25 et 35 %, montre que la précision du modèle interne de la dynamique du système contrôlé est assez faible. On peut, de la même manière, étudiée la relation entre la précision du modèle interne et les performances en poursuite en calculant l'indice de dissemblance suivant (dans le domaine temporel)

$$E_{tracking} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=0}^{t=n} (c(t) - x(t))^2}$$

exprimé comme un pourcentage de l'amplitude maximale de la trajectoire de la cible. Nous avons ainsi observé une covariance très claire entre le niveau de performance de chaque sujet et la qualité de l'estimation du modèle interne qu'il utilise (figure 36-c). Ces résultats suggèrent que le comportement d'un opérateur

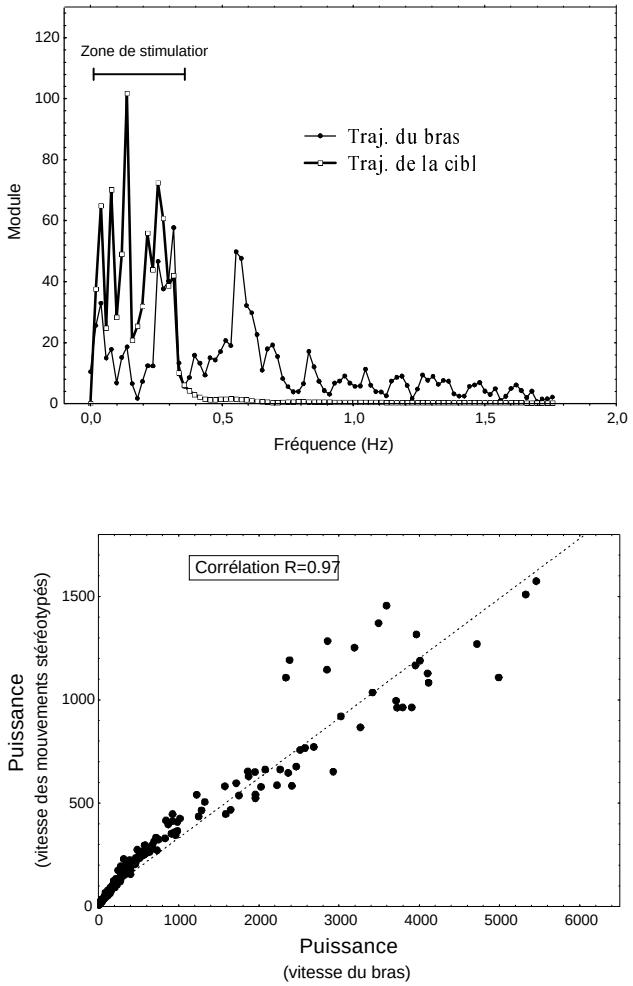

Figure 35. Figure du haut: comparaison des composantes fréquentielles de la trajectoire de la cible (courbe épaisse) et du manche (courbe fine) pour la trajectoire 'large bande'. La trajectoire du manche comporte des composantes fréquentielles significatives situées bien au delà de la zone de stimulation. Figure du bas : tracé de la puissance moyenne de la vitesse du manche (expurgée des mouvements non stéréotypés) en fonction de la puissance moyenne de la trajectoire originale du manche. Ce tracé ne concerne que les fréquences supérieures à 0,5 Hz (moyennes calculées sur tous les sujets).

humain impliqué dans une telle tâche peut être raisonnablement modélisé (dans le domaine de fréquence de la stimulation visuelle) comme un contrôleur linéaire travaillant en boucle ouverte.

La procédure d'identification du modèle en boucle fermée ne nous a pas conduit à des résultats concluants. En effet, la composante haute fréquence introduite par le comportement fortement non linéaire des opérateurs empêche l'identification de tout modèle linéaire en boucle fermée: quand un bruit d'amplitude significative est ajouté à la sortie d'un servo contrôleur, l'estimation de sa fonction de transfert se rapproche de façon trompeuse de la fonction de transfert inverse de l'élément contrôlé, ici la fonction de transfert inverse du système dynamique [3, Akaike, 1968] [43, Chatfield, 1989] .

8.3.3 Identification des variables composites

La figure 37 montre un exemple de distribution des vecteurs d'erreur de poursuite dans un espace d'erreur 3D dont les trois axes donnent respectivement l'erreur de poursuite, ses dérivées première et seconde pour un délai (temps de réaction δ = 320 ms) correspondant au meilleur coefficient de régression ($R = 0.9$). Les points obtenus sont clairement séparés en deux goupes correspondant respectivement au déclenchement de mouvements de corrections effectués de la droite vers la gauche et de la gauche vers la droite. Les deux plans tracés représentent le résultat de la régression biplanaire, c'est à dire les limites du domaine de l'espace 3-D de l'erreur à l'intérieur duquel un mouvement stéréotypé a une faible probabilité d'être déclenché. Quand le vecteur d'erreur instantané $[e(t), e'(t), e''(t)]$ dépasse cette limite, le sujet déclenche un mouvement «en échelon» produit en boucle ouverte.

Les résultats des régressions biplanaires ont été moyennés pour tous les sujets et pour toutes les trajectoires de cibles. La présence du retour d'effort ne semble pas avoir d'influence significative sur la stratégie des sujets (et sur les résultats de cette analyse). Nous ne retiendrons donc pas cette condition expérimentale dans la présentation des résultats. La figure (38-haut) montre que le coefficient de régression moyen atteint une valeur maximale (R =0,74) pour un délai δ_1 égal à 290 ms, mais un pic d'amplitude plus faible apparaît plus tôt pour un délai δ_2 compris entre 120 ms et 130 ms. Cependant, la variable composite correspondant à ce premier pic n'est pas stable ($\zeta_2 < 0$, figure 38-centre). D'autre part, on observe que la fréquence naturelle estimée est quasiment constante pour tous les délais δ (0,22 Hz).

Finallement, le modèle biplanaire moyen obtenu pour un temps de réaction δ_1 correspond à une variable glissante valide (stable) dont les paramètres sont $\varpi/2\Pi = 0,22$ Hz et $\zeta = 0,18$ (alors que $\varpi_{sys}/2\Pi = 0,193$ Hz et $\zeta_{sys} = 0,0727$).

La figure 39 représente, pour un essai donné, la valeur de la variable composite tracée en fonction du temps. En dépit de l'aspect doux de la trajectoire de la sortie du système dynamique, des pics de vitesse importants sont présents dans la trajectoire de la main. Les paramètres de la variable glissante ont été estimés

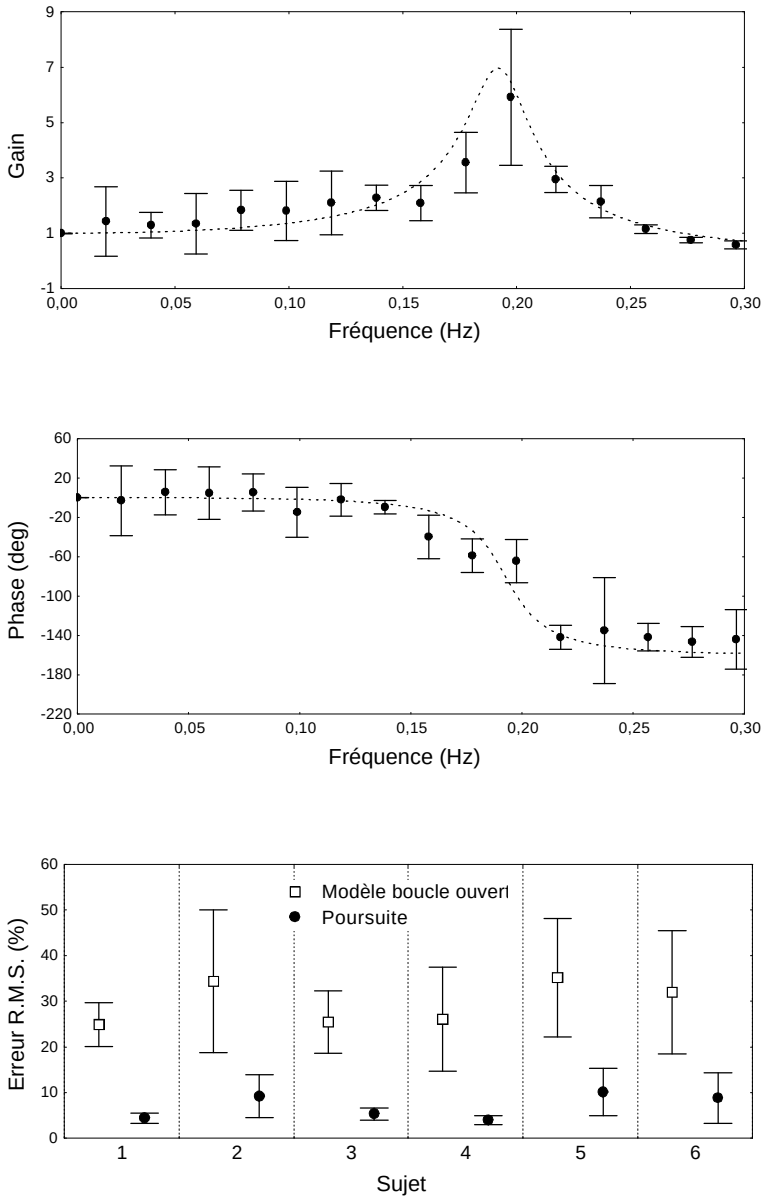

Figure 36. Courbe de gain (en haut) et de phase (au centre) de l'estimation, a partir du modèle, de la fonction de transfert en boucle ouverte ($\widehat{H}^{-1}_{OLM}$) et ce pour la trajectoire 'large bande' T5. Cette fonction de transfert n'est définie que sur la zone de stimulation. Les tracés en pointillés donnent respectivement la courbe de gain et de phase du système dynamique simulé. Figure du bas: erreur R.M.S et écarts types illustrant respectivement la qualité du modèle interne (rectangles vides) et le niveau de performance (points noirs) de chacun des sujets.

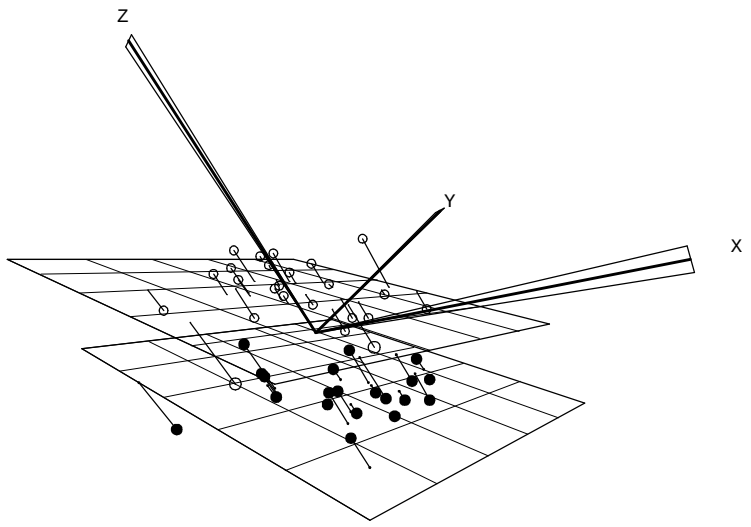

Figure 37. Illustration graphique du résultat d'une régression biplanaire. Les points de la figure représentent la position du vecteur d'erreur $[e(t), e'(t), e''(t)]$ dans un espace tridimensionnel δ ms avant le déclenchement des mouvements stéréotypés correspondants effectués respectivement de gauche à droite (cercles vides) et de droite à gauche (cercles pleins). La figure a été tracée pour le coefficient de régression le plus élevé (R=0,9) correspondant à un temps de réaction δ du sujet égal à 320 ms. Les axes X, Y et Z correspondent à l'erreur, la dérivée de l'erreur et son accélération. Les lignes en traits fins attachées aux points représentent les distances minimisées lors de la procédure de régression dont le résultat est matérialisé par les deux plans parallèles.

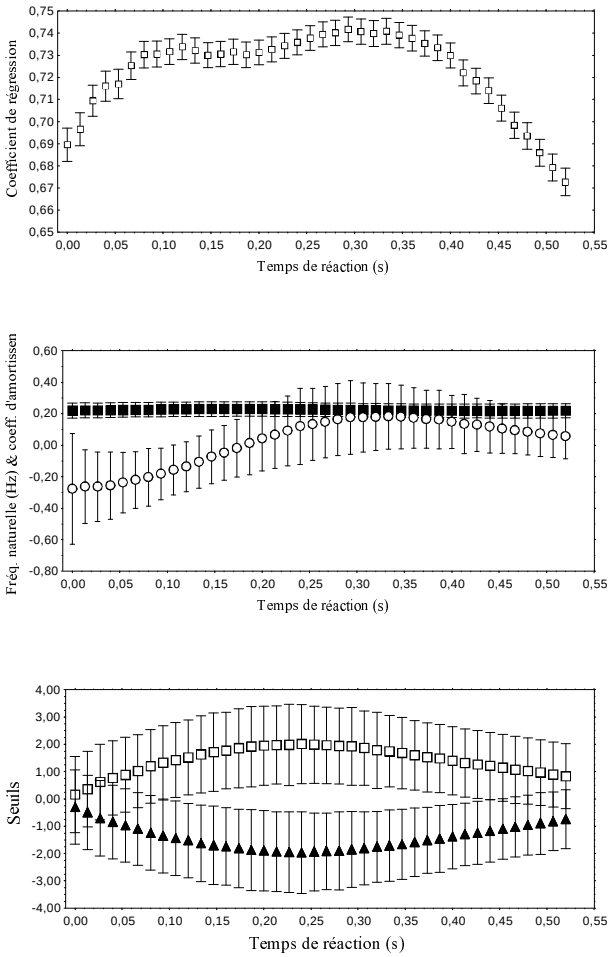

Figure 38. Résultats obtenus pour tous les sujets et toutes les épreuves. **Figure du haut**: valeur moyenne et écart type du coefficient de régression biplanaire en fonction du temps de réaction δ. **Au centre**: fréquence naturelle moyenne ϖ (carrés noirs) et coefficient d'amortissement moyen ζ (cercles vides) en fonction du temps de réaction. **En bas**: valeur moyenne et écart type des seuils c^+ (carrés) et c^- (triangles) en fonction du temps de réaction.

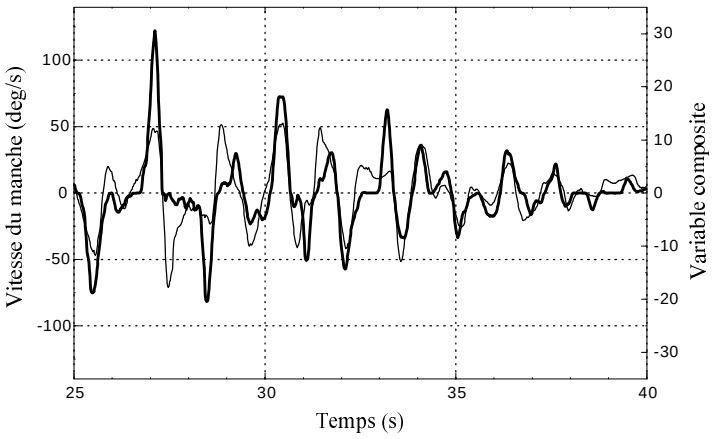

Figure 39. Exemple de l'évolution temporelle de la vitesse du manche $u'(t)$ (trait épais, échelle de gauche) et de la variable composite $s(t-\delta)$ (trait fin, échelle de droite). La série temporelle $s(t)$ a ainsi été décalée temporellement de façon à annuler le décalage induit par le temps de réaction δ (celui correspondant au meilleur coefficient de régression biplanaire).

en utilisant seulement les phases de mouvement remplissant les critères sévères définis dans les méthodes (un seul pic de vitesse séparé par deux périodes de quasi-immobilité). Cependant, la trajectoire de $s(t)$ calculée en utilisant les paramètres moyens ci-dessus apparaît comme une bonnne prédiction de la vitesse du bras, et plus particulièrement, comme le prédit le modèle «variable glissante», de la direction des déplacements de la main.

Nous avons tracé sur la figure 40 les paramètres estimés de la variable glissante moyenne obtenue pour chaque sujet. Nous avons également quantifié le niveau de performance de chacun des sujets en utilisant le score suivant

$$Score = -\log\left[\frac{1}{n}\sum_{t=0}^{t=n}\left(c(t)-x(t)\right)^2\right]$$

Ce score possède des «propriétés statistiques» meilleures que l'estimateur $E_{tracking}$. Contrairement à $E_{tracking}$, la distribution de la variable score est proche de la distribution normale et possède une variance indépendante de sa valeur moyenne. Les seuils, fréquences naturelles et coefficients d'amortissement ne diffèrent pas significativement d'un sujet à l'autre. Cependant, nous avons observé une tendance claire pour un score élevé d'être associé à une valeur importante à la fois de fréquence naturelle et de coefficient d'amortissement. De plus, la différence entre les seuils de déclenchement est la plus faible pour le sujet qui possède le niveau de performance le plus élevé (Sujet n°4).

Pour étudier l'influence de l'apprentissage sur les paramètres de la variable glissante, nous avons séparé nos sujets en deux groupes:

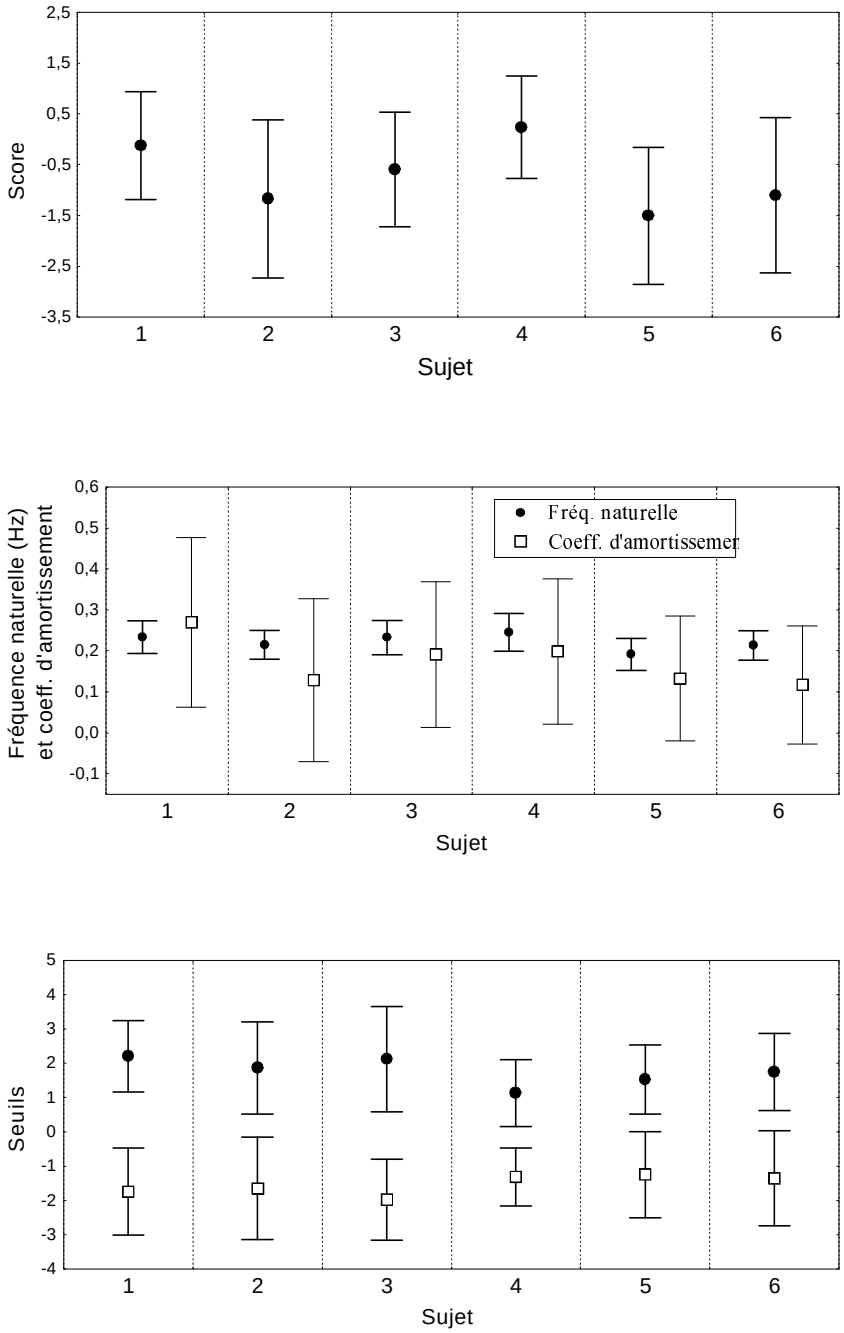

Figure 40. Comparaison, pour les six sujets, des scores de poursuite (**figure du haut**), des valeurs des paramètres de la variable composite (**au centre**, cercles pleins pour la fréquence naturelle, carrés vides pour le coefficient d'amortissement) et des valeurs des seuils de déclenchement des mouvements stéréotypés (**figure du bas**).

- les trois meilleurs opérateurs dont les performances semble dépendre faiblement de la pratique,
- les trois autres sujets (sujets 2, 5 et 6) pour lesquels l'influence de la pratique (numéro de l'essai) sur la variable score est significative ($p < 3.10^{-5}$, figure 41-haut).

Pour ce dernier groupe de sujets, la fréquence naturelle moyenne augmente de manière significative avec la pratique alors que la largeur de la «morte zone» (la différence entre le seuil positif et le seuil négatif) décroît significativement (figure 41-centre et bas). Ces résultats doivent être considérés avec prudence car ils ne concerne que trois sujets. Cependant, la corrélation observée entre l'évolution des scores d'une part et l'évolution de la largeur de la «morte zone» et de la fréquence naturelle au cours de l'apprentissage d'autre part peut également s'interpréter dans le cadre du contrôle par surfaces glissantes. Le choix des paramètres de la variable glissante est en effet guidé par deux contraintes de natures diffférentes:

- d'une part la contrainte de stabilité $\zeta > 0$,
- d'autre part des limitations dues soit à des caractéristiques dynamiques du système contrôlé non prises en compte par le modèle interne, soit à l'existence de retards purs [230, Slotine et Li, 1991] .

Ainsi, l'accroissement de la qualité du modèle interne (H_{OLM}^{-1}) avec la pratique peut inciter les sujets à réduire la largeur de la «morte zone» qui peut être considérée comme une «marge de sécurité» permettant de conserver un contrôle stable en dépit des incertitudes concernant la dynamique du système contrôlé. D'après l'équation (8.71), l'erreur de poursuite $e(t)$ est égale à la réponse d'un filtre du second ordre dont l'entrée est $s(t)$. La fréquence naturelle et le coefficient d'amortissement définissent la façon dont les limites imposées à $s(t)$ (liées à la largeur de la morte zone) bornent l'évolution de $e(t)$ et influent donc sur la qualité de la poursuite. Cette relation établit un compromis «qualité de la modélisation»/«qualité de la performance»: un sujet qui, par la pratique, acquière un meilleur modèle interne du système peut alors à la fois diminuer la largeur de sa marge de sécurité (largeur de la morte zone) et augmenter la fréquence naturelle et le coefficient d'amortissement de la variable glissante associée au contrôle. Cette démarche a pour résultat la réduction de l'amplitude des erreurs commises mais elle augmente en contre partie la sensibilité du sujet aux variations de l'erreur de poursuite. Cette hypothèse est soutenue par le fait que les sujets 1,3 et 4 présentent à la fois les meilleurs performances et les fréquences naturelles et facteurs d'amortissement les plus élevés (figure 40-centre).

8.4 Discussion

Les résultats de notre essai de modélisation des stratégies de contrôle des sujets sous la forme de fonctions de transfert linéaires confirment, pour cette tâche particulière, que cette interprétation inspirée de la théorie du contrôle des systèmes linéaires est soumise à caution. Nous avons montré que si l'opérateur peut être raisonnable-

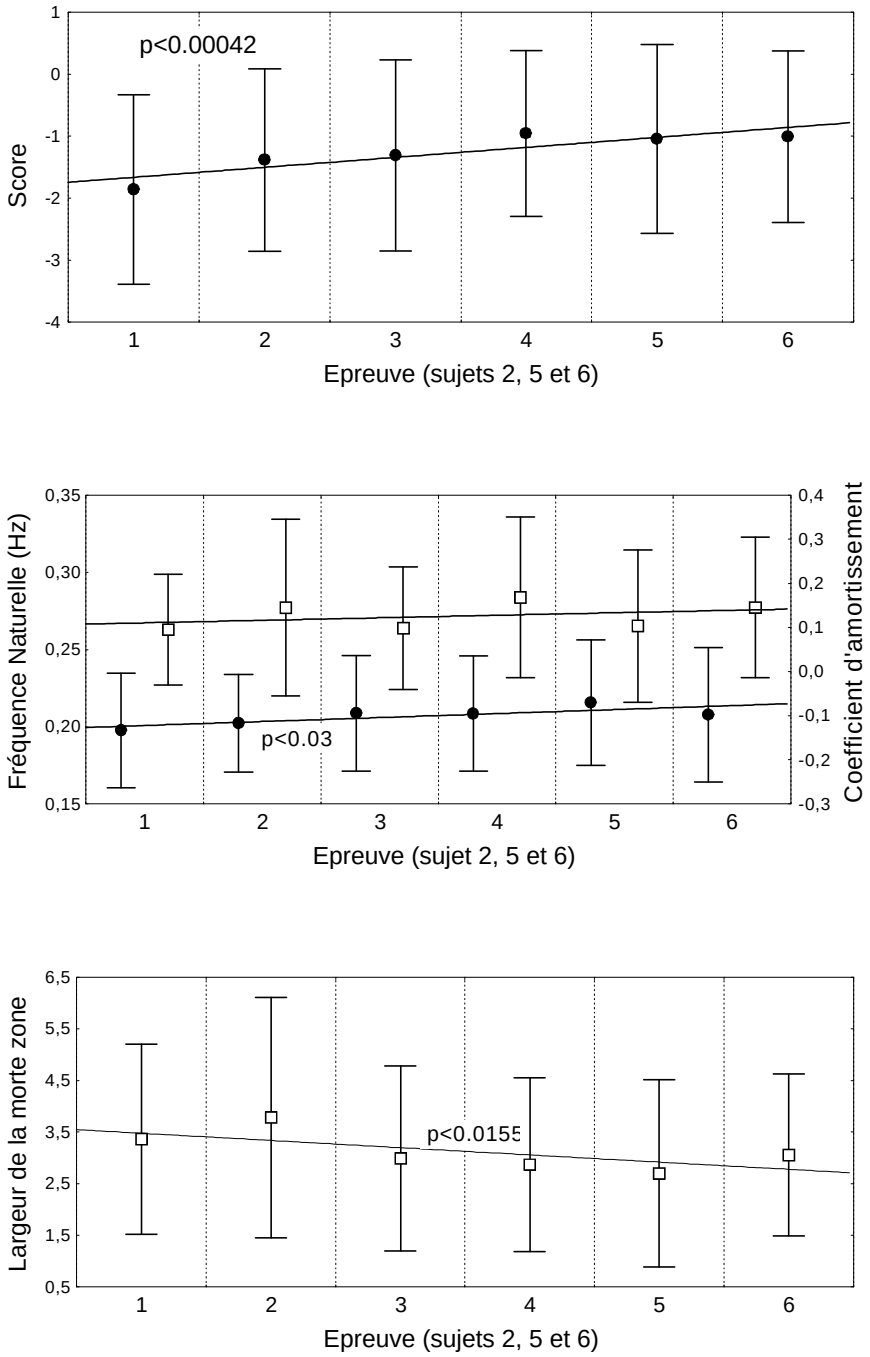

Figure 41. Influence de la pratique sur l'évolution des paramètres de la variable composite et des seuils pour les sujets 2, 5 et 6. **Figure du haut**: évolution du score moyen et de son écart type. **Au centre**: évolution de la fréquence naturelle moyenne (cercles pleins) et du coefficient d'amortissement (carrés vides). **En bas**: décroissance de la largeur de la morte-zone avec la pratique (cette largeur est la différence entre les seuils positifs et négatifs c^+ et c^-).

ment modélisé comme un contrôleur linéaire fonctionnant en boucle ouverte dans le domaine de fréquence de la stimulation visuelle, les mouvements stéréotypés qu'il produit de façon intermittente jouent un rôle important dans la tâche de contrôle. La très forte corrélation observée entre le spectre de puissance de ces mouvements et la composante haute fréquence suggère que celle-ci à son origine dans ces mouvements même et qu'ils constituent une part essentielle de la commande produite par les sujets (figure 35-haut). Si cette composante haute fréquence n'était pas corrélée avec la stimulation visuelle ou avec l'erreur de poursuite, elle perturberait alors de manière significative la commande linéaire $\overline{U}(t)$ produite par les sujets. Mais, de toute évidence, les sujets réussissent à accomplir de manière satisfaisante la tâche car la sortie du système suit étroitement la trajectoire de la cible (ces bonnes performances pourraient cependant s'expliquer par un filtrage passe-bas de la composante haute fréquence par la dynamique du système).

Nous proposons que la génération de mouvements «saccadiques» au profil stéréotypé durant le contrôle visuomanuel d'un système dynamique inconnu peut être décrit par un schéma de contrôle apparenté au contrôle par surface glissante utilisé par les roboticiens. Une bonne description de cette stratégie peut être obtenue en considérant que les sujets essayent de minimiser une variable glissante $s(t)$, qui est une combinaison linéaire de l'erreur de poursuite et de ses dérivées premières et secondes. Cette hypothèse est soutenue par plusieurs observations concordantes:

- le temps de réaction $\delta = 290$ ms correspondant à la plus haute valeur du coefficient de régression du modèle est physiologiquement plausible, dans la fourchette des valeurs obtenues pour des tâches de poursuite ou de pointage visuo-manuel,
- la dynamique du filtre linéaire implicite associé à $s(t)$ est stable,
- les seuils de déclenchement $c+$ et $c-$ ont des signes opposés et sont de valeurs absolues comparables (1.8 deg.s^{-2}),
- les différences trouvées entre les sujets et l'évolution de la fréquence naturelle et du coefficient d'amortissement avec la pratique peuvent être interprétées comme résultant d'un compromis entre précision du modèle interne et qualité de la poursuite, compromis également prédit par la théorie du contrôle par surfaces glissantes.

La valeur relativement faible du coefficient de régression R ($R = 0.74$) peut s'expliquer par une imprécision dans la détection des mouvements correctifs durant l'analyse des trajectoires de la main. Certaines phases de mouvement, reconnues comme non stéréotypées, correspondent probablement à des phases balistiques successives qui ont été ensuite filtrées par la dynamique du bras et ont échappé ainsi à notre analyse. L'estimation du temps de réaction δ peut également avoir été faussée à cause du filtrage de la commande motoneuronale par la biomécanique du bras: si, au cours d'un essai, le bras se déplace avec une vitesse importante dans une di-

rection, un mouvement correctif initié dans la direction inverse est alors freiné de manière importante et son déclenchement peut être difficile à détecter. Le pic de corrélation n'est pas très aigu certainement parce que la variable composite présente une dynamique lente, et donc de faibles variations sur l'intervalle des délais pris en compte (500 ms, voir figure 39). De plus, on peut s'attendre à obtenir des coefficient de régression plus élevés en utilisant un modèle plus général et plus plausible incluant des non linéarités dans la définition (8.71) de la variable composite.

Plus généralement, les phases de mouvement balistiques observées durant des tâches de poursuite visuomanuelles classiques[35] ou des tâches de poursuite incluant un retard [167, Miall et al., 1985] pourraient également être déclenchées par une variable glissante. Certains auteurs proposent que l'existence d'une morte zone positionnelle (affectant la prise en compte des valeurs faibles de l'erreur de poursuite) permettrait d'expliquer les résultats obtenus [264, Wolpert et al., 1992] . Dans notre modèle, la région de l'espace du vecteur d'erreur bornée par les deux plans définis par les paramètres de la variable composite peut aussi être considérée comme une morte zone. Cependant, son étendue ne dépend pas seulement de l'erreur de poursuite instantanée mais aussi de ses dérivées premières et secondes. Ceci pourrait expliquer le fait que la taille de la morte zone proposée par les auteurs dans une tâche de poursuite compensatoire semble varier avec la vitesse de déplacement de la cible. D'autres études, plus anciennes, ont présenté des hypothèses proches de la notre concernant le critère minimisé par les sujets lors de tâches de poursuite impliquant le contrôle d'un système dynamique. Smith, dans une étude concernant la dynamique des interactions Homme-machine, propose

> «qu'un sujet contrôlant un système dynamique ne se sert pas de l'erreur instantanée, mais d'une fonction dynamique de l'erreur, construite telle que la boucle de contrôle globale incluant l'homme, soit stable»[231, Smith, 1962] .

Dans une autre étude, impliquant le contrôle d'un canon anti-aérien, les sujets responsable du contrôle de l'azimuth de l'appareil lors de la poursuite de la trajectoire (apprise) d'une cible aérienne alternent entre deux types de stratégies [202, Repperger et al., 1979] . Les essais commencent par une phase de poursuite qui est mise en échec lorsque la vitesse et l'accélération de la cible dépasse les capacités du système de poursuite humain. Cette phase est alors suivie d'une période durant laquelle les opérateurs ne font plus attention à l'erreur de poursuite commise, mais au contraire essayent de «réacquérir» la cible pour une autre phase de poursuite. Les auteurs suggèrent de décrire la limite entre ces deux modes de contrôle par une ellipse dans le plan de phase de l'erreur $[e(t), e'(t)]$, ellipse centrée sur l'origine. Ainsi, les erreurs d'azimuth $e(t)$ vérifiant l'équation

$$e(t)^2/R_1^2 + e'(t)^2/R_2^2 < 1 \tag{8.72}$$

[35] Tâches n'impliquant pas le contrôle d'un système dynamique (autre que le bras du sujet).

induisent un comportement de poursuite «douce» des opérateurs alors que si cette erreur dépasse les frontières de cette région, ceux-ci passent en mode de «réacquisition» avec des mouvements effectués en boucle ouverte. L'équation (8.72) peut être interprétée comme définissant une variable composite, une combinaison (non linéaire) de l'erreur de poursuite instantanée et de sa dérivée première. Comme c'est le cas pour le modèle proposé dans cette étude, cette variable est également responsable du déclenchement de mouvements de type balistique déclenchés en boucle ouverte. Une étude très récente propose également que des variables composites hétérogènes combinant des information de force et de position soit utilisées par le système nerveux central (plus précisément par le cervelet) pour vaincre les instabilités possibles dues à la présence de délais important des informations neuronales sensorielles et motrices [155, Massaquoi et Slotine, 1996] .

L'utilisation de telles combinaisons de signaux par le cerveau est attestée par de nombreuses études neurophysiologiques. Dans différentes structures impliquées dans le contrôle moteur, les allures phasi-toniques de décharge des neurones ont été interprétées comme des combinaisons de signaux de position, de vitesse, et même d'accélération du segment du corps considéré. De bonnes corrélations ont été ainsi mises en évidence pour les mouvements des yeux ou des mouvements de pointage

- dans le prépositus et le cervelet du singe (respectivement [158, McFarland et Fuchs, 1992] et [228, Shidara et al., 1993]),
- dans le prepositus et le noyau vestibulaire du chat ([20, Bethoz et al., 1989] , [62, Escudero et al., 1992]),
- dans dans le noyau vestibulaire du lapin et du singe ([241, Stahl et Simpson, 1995] , [267, Zhang et al., 1995]),
- dans le cortex somatosensoriel des primates ([198, Prud'homme et Kalaska, 1994]).

De plus, dans le noyau rouge du chat et du primate, une forte corrélation existe entre

- la fréquence de décharge des neurones
- le couple exercé et sa dérivée temporelle

lors d'une tâche de poursuite isométrique de la force appliquée soit avec le poignet soit avec la jambe ([166, Mewes et Cheney, 1994] , [256, Vicario et al., 1983]). Enfin, même au niveau des récepteurs sensoriels, la réponse des fuseaux musculaires est corrélée à la longueur du muscle mais aussi avec sa vitesse d'allongement alors que la décharge des organes de Golgi semble dépendre à la fois de la tension active du muscle et de sa dérivée première ([107, Jami, 1992] Jami 1992).

La motivation de cette étude est l'identification des évenements sensoriels qui sont responsables du déclenchement des mouvements stéréotypés intermittents. Nous n'avons soutenu aucune hypothèse sur la façon

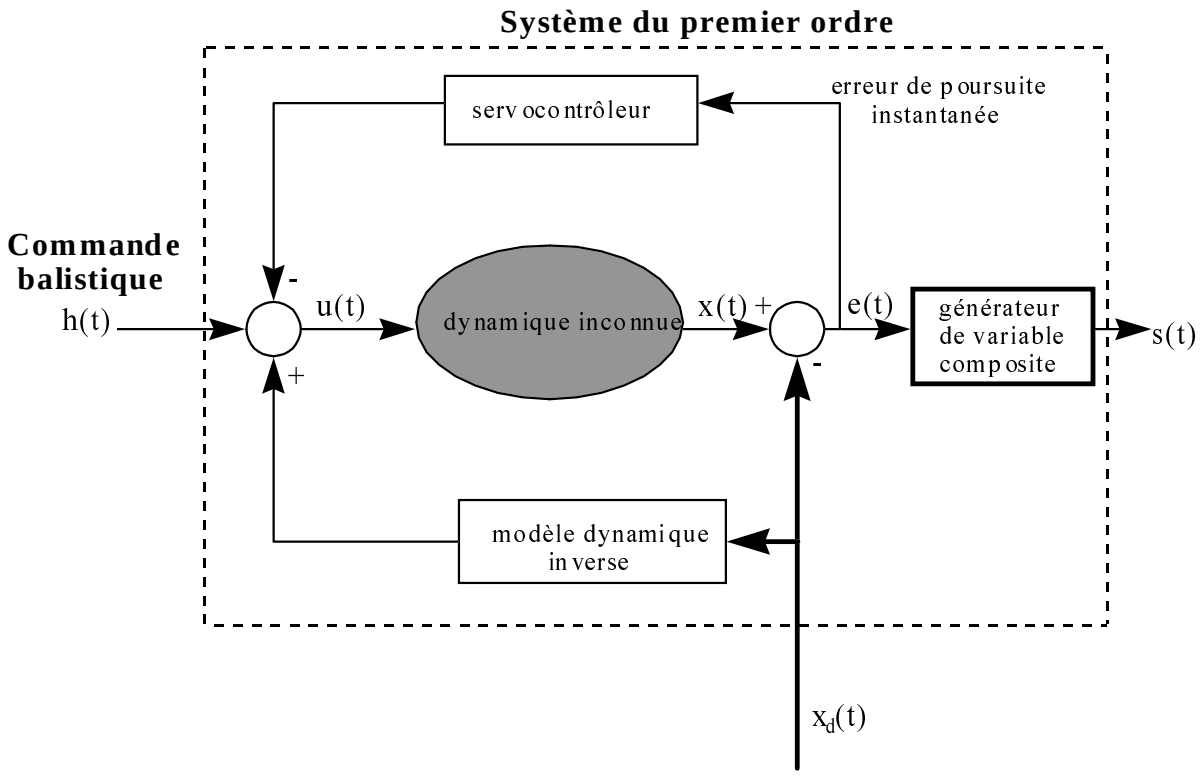

Figure 42. Modélisation du contrôle utilisé par les sujets pour la poursuite visuomanuelle. Les sujets minimisent une erreur dynamique $s(t)$ («variable composite») grâce à la superposition de deux stratégies de contrôle. Deux types de contrôleurs utilisant l'un un servocontrôle, l'autre un modèle dynamique inverse, permettent de réduire l'ordre du système global (limité par le cadre en pointillés) à l'unité. Cette partie de la commande est générée en continu. Un signal de commande supplémentaire $h(t)$ compense les imprécisions du modèle dynamique inverse. Cette partie de la commande n'est pas continue, mais intermittente et composée de mouvements stéréotypés produits en boucle ouverte.

dont le système nerveux central programme l'amplitude ou la durée de ces mouvements. Cependant, l'hypothèse la plus simple voudrait qu'il utilise à la fois un mécanisme en boucle ouverte et un mécanisme en boucle fermée pour que l'ordre du système résultant soit réduit au premier ordre (figure 42). Quand la valeur de la variable glissante (liée à la structure de l'élément agissant en retour) dépasse son seuil, l'amplitude et la durée du mouvement stéréotypé initié peut être calculée pour que cette variable retourne à la fin du mouvement ou avant sous le seuil (voir le chapitre 4.6 de la seconde partie). Nous suggérons enfin qu'une analyse similaire puisse également être appliquée à un large répertoire de comportements impliquant une boucle sensorimotrice. En effet, on observe également un mélange de poursuite lente et de mouvements rapides balistiques dans des enregistrements issus de mouvements de poursuite oculaire, de réflexes vestibulo-oculaires et de réajustements posturaux.

Il est important de préciser que cette hypothèse peut également être généralisée à d'autres modes de contrôle et à d'autres segments corporels que ceux impliqués dans la tâche décrite dans ce chapitre. Les résultats

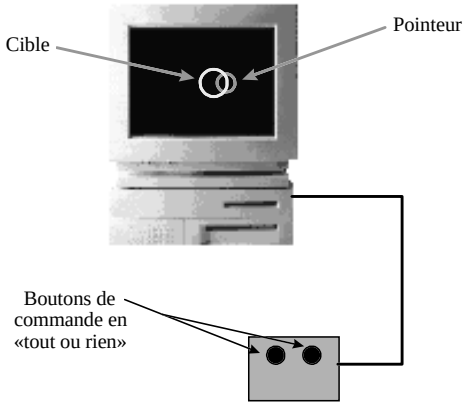

Figure 43. Dispositif expérimental destiné à vérifier l'hypothèse des variables composites dans le cadre d'une interface de commande n'autorisant qu'un contrôle en «tout ou rien». Deux boutons indépendants permettent au sujet d'envoyer au système mécanique une impulsion d'amplitude fixe. Le bouton choisi détermine le signe de la commande.

obtenus lors d'une expérience préliminaire soutiennent cette affirmation. Les conditions expérimentales ainsi que le système dynamique y sont les mêmes que dans les expériences décrites dans ce chapitre. Nous avons par contre modifié la façon dont le sujet agit sur le système dynamique à manipuler. En effet, la commande angulaire continue du manche à balais est remplacée par une commande en tout ou rien[36]. Cette commande est générée via un système à deux boutons[37] (figure 43). Si le sujet ne presse aucun des deux boutons, la commande $u(t)$ est nulle et le système dynamique est alors en évolution libre. L'appui sur le bouton gauche provoque le passage de la commande à une valeur négative $u(t) = u_g$ ($u_g < 0$) alors qu'un appui sur le bouton droit entraîne le passage à une valeur positive $u(t) = u_d = -u_g$. Lorsque l'appui perdure, la commande garde la valeur constante correspondant au bouton choisi. Ce système permet en fait d'imposer au sujet un répertoire moteur limité dont la stéréotypie est fixée par l'expérimentateur. Le sujet n'a de plus pas la possibilité de produire la composante continue («basse fréquence») observée lors des manipulations avec le manche à retour d'effort. Enfin, ce mode de contrôle nous permet d'estimer beaucoup plus précisément l'instant correspondant au déclenchement des mouvements stéréotypés, c'est à dire l'instant de l'appui ou du lâcher d'un bouton. Il faut noter que le répertoire moteur mobilisé concerne uniquement les segment distaux de la main (bras et avant-bras sont maintenus immobiles). L'expérience a été réalisée uniquement avec le premier type d'environnement visuel, ne comportant pas d'indices prédictifs[38].

Les sujets réussissent convenablement la tâche. Les résultats préliminaires présentés sur la figure (45) ne

[36] Bien sûr, ce dispositif ne permet pas la génération d'un retour d'effort.
[37] En l'ocurrence une souris d'oridinateur fixée sur le plan de travail.
[38] Pas de ligne défilante donnant la possibilité au sujet d'anticiper la trajectoire de la cible. Chaque essai dure deux minutes et la trajectoire de la cible est un mélange de cinq sinusoïdes de même amplitude mais de fréquences et de déphasages aléatoires. Les composantes fréquentielles du stimulus sont comprises entre 0 et 0,5 Hz. La fréquence de rafraîchissement des images est 75 Hz. La consigne donnée aux sujets est de maintenir autant que possible le petit pointeur rouge (sortie du système dynamique simulé) à l'intérieur du cercle vert plus grand figurant la cible.

concernent qu'un sujet et un seul essai mais nous semblent tout à fait probants. Cette figure est à comparer avec la figure (38) qui elle est une moyenne obtenue pour différents essais et pour tous les sujets. Nous avons ici procédé à une analyse des résultats légèrement différente de celle utilisée pour l'expérience avec manche à balai. Nous nous sommes intéressés à quatre types d'évènements classés en deux groupes: l'appui et le relâchement du bouton gauche (premier groupe) et l'appui et le relâchement du bouton droit (second groupe). Conformément à l'hypothèse de la minimisation d'une variable composite, les deux groupes d'évenement doivent correspondre au passage de la frontière d'une région délimitée par deux plans parallèles dans l'espace du vecteur d'erreur 3D:

- l'appui et le relâchement[39] du bouton gauche doivent marquer respectivement la sortie et l'entrée, par le passage à travers un des plans, du vecteur d'erreur dans la région de commande nulle,
- l'appui et le relâchement du bouton droit correspondent au franchissement de la seconde frontière.

L'identification des deux frontières planes a été conduite par deux régressions linéaires séparées pour les deux groupes d'évènements, et pour des délais supposés de réponse des sujets allant de -1,5 s à 1,5 s (les deux plans correspondant au meilleur coefficient de corrélation moyen sont donnés sur la figure 44). La figure (45) donne les paramètres des variables composites estimés à partir des caractéristiques des deux plans ainsi que les coefficients de corrélation de chaque régression linéaire (et le coefficient de régression moyen). On retrouve sur cette figure une situation tout à fait analogue à celle rencontrée dans l'expérience à commande continue. Les paramètres des deux plans sont très proches car les courbes obtenues pour les deux groupes d'évènements évoluent de façon quasi-parallèle avec le délai considéré. Les deux pics principaux du coefficient de corrélation sont de natures différentes. Le premier pic de corrélation, très élevé, marque une discontinuité dans la courbe (figure 45-A) et correspond à un délai nul et à un coefficient d'amortissement négatif (variable composite instable, figure 45-C). Le second pic, placé à environ 400 ms, peut être associé à une variable composite stable car le coefficient d'amortissement est alors positif (entre 0,4 et 0,5). Il est très raisonnable de penser que le pic de corrélation observé à $\delta = 0$ reflète une corrélation liée à la dynamique intrinsèque du système (cela reste à démontrer).

Ces résultats préliminaires montrent que l'hypothèse de la minimisation d'une variable composite reste vérifiée pour une tâche mobilisant un mode de contrôle différent et des segments corporels plus distaux.

[39] Notez que le relâchement d'un bouton est l'analogue, pour la commande continue, de la fin d'un mouvement stéréotypé. Nous n'avons pas pris en compte ce type d'évènement dans l'expérience avec le manche à balais du fait de la difficulté d'estimer l'instant où un tel mouvement se termine.

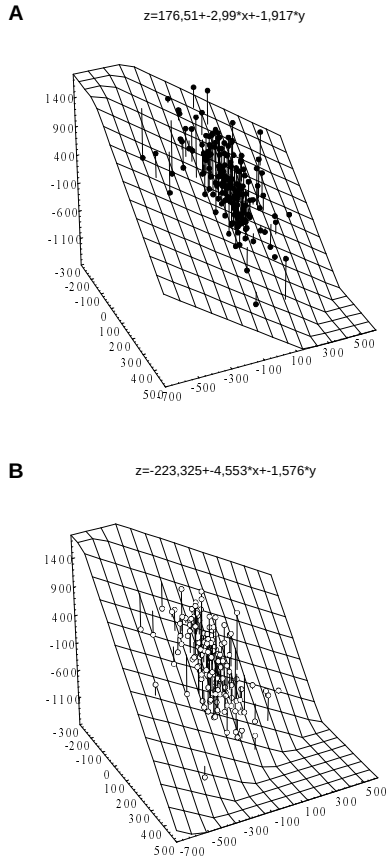

Figure 44. Représentation dans l'espace 3D du vecteur d'erreur E[$x = e(t), y = \dot{e}(t), z = \ddot{e}(t)$] de la position des points marquant l'appui ou le lâcher du bouton gauche (A) ou l'appui ou le lâcher du bouton droit (B). L'équation du plan de régression est indiquée au dessus de chaque graphique. Les deux figures ont été tracées pour un temps de réaction $\delta = 350$ ms correspondant au pic du coefficient de régression moyen ($R_m = 0,6765$). Les unités sont ici en pixels pour $e(t)$, en pixels/s pour $\dot{e}(t)$ et en pixels/s^2 pour $\dot{e}(t)$.

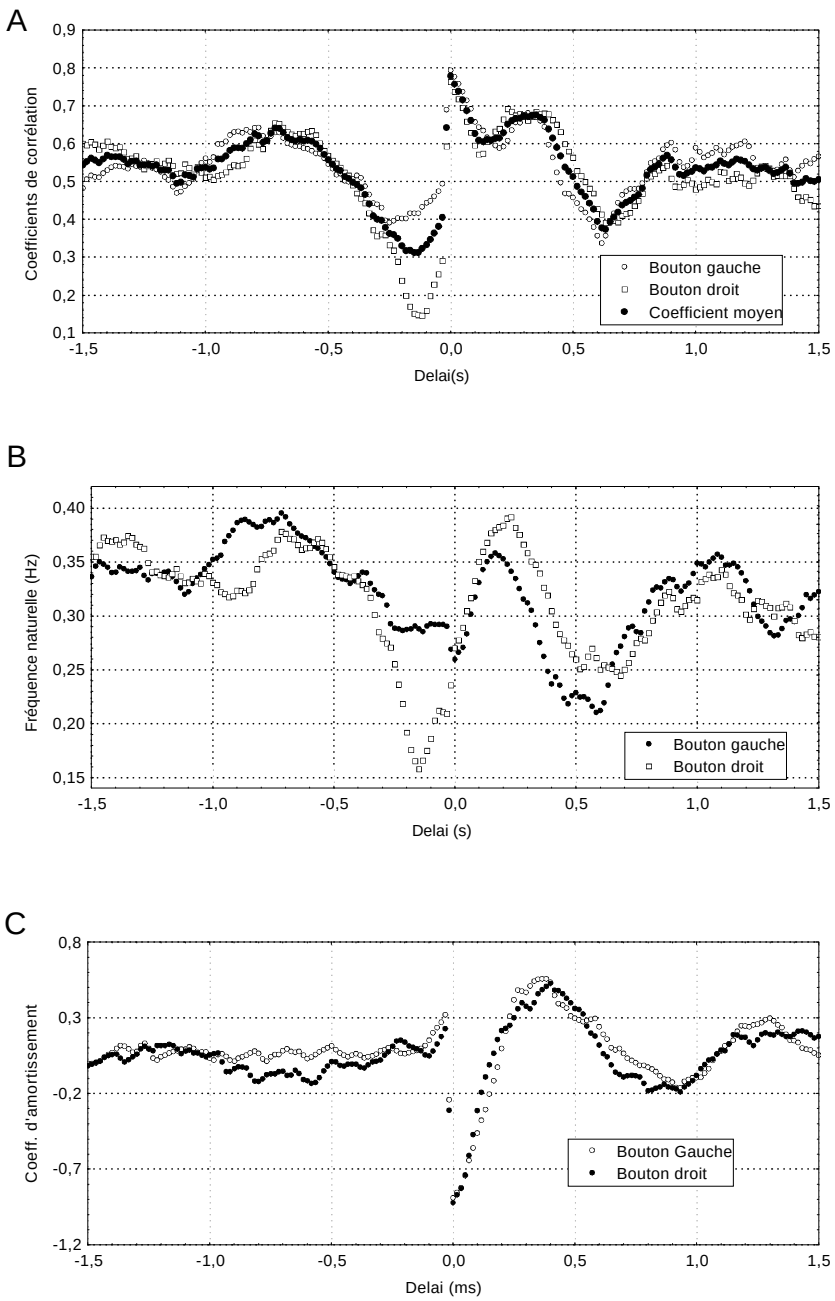

Figure 45. Exemple de résultat obtenu dans le cadre de l'expérience avec commande en «tout ou rien» (un seul sujet, un seul essai durant deux minutes). A) Evolution des coefficient de corrélation des régressions linéaires pour le bouton gauche, pour le bouton droit, et coefficient de régression moyen en fonction du temps de réaction. B) Fréquences naturelles des variables composites en fonction du temps de réaction. C) Evolution des coefficients de corrélation en fonction du temps de réaction. Voir le texte pour plus de détails.