

Université de Montréal

**Correction d'une erreur induite expérimentalement :  
Je ne l'ai pas vue.....mais je l'ai corrigée quand même.**

Par

Ahmad Adel Al Roujoula

Département de kinésiologie

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de M.Sc.  
en sciences de l'activité physique

décembre, 2004

© Ahmad Adel Al Roujoula, 2004



GV  
201  
U54  
2005  
V.006

Direction des bibliothèques

## AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

## NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Ahmad Adel Al Roujoula, 2004

Université de Montréal

Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

**Correction d'une erreur induite expérimentalement :  
Je ne l'ai pas vue.....mais je l'ai corrigée quand même.**

Présenté par :

Ahmad Adel Al Roujoula

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

Yvan Girardin	Président-rapporteur
Julie Messier	Directrice de recherche
Luc Proteau	Codirecteur
Claude Alain	Membre du jury

## **RÉSUMÉ**

## Résumé

Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur les mécanismes de contrôle en temps réel des mouvements d'atteintes manuelles vers des cibles visuelles. Les résultats d'études récentes suggèrent que le système nerveux central traite les informations visuelles afin de corriger rapidement et automatiquement les erreurs dans le déplacement de la main. Nous avons vérifié le bien-fondé de cette hypothèse en testant l'effet d'une perturbation visuelle- un saut de la position du curseur représentant la main- sur la précision d'atteintes manuelles vers des cibles visuelles. Les participants devaient déplacer un curseur présenté sur un écran d'ordinateur vers cinq cibles visuelles présentées une à la fois. Pour 20% des essais, la position du curseur était déplacée de 30 mm vers la gauche (expérience 1) ou vers la droite (expériences 2, 3) de sa trajectoire tôt après l'amorce du mouvement. Dans les deux premières expériences, le curseur demeurait visible durant la totalité du mouvement. Cependant, dans la troisième expérience, la vision du curseur était retirée durant la seconde portion du mouvement pour certains essais. Bien que les participants ne pouvaient percevoir ce 'saut de curseur', ils ont tous produit, pour la grande majorité des essais, des corrections appropriées permettant de compenser pour cette perturbation visuelle. Des analyses détaillées du décours temporel de ces corrections ont indiqué que ces dernières étaient amorcées très tôt après l'application du saut de curseur. Des corrections rapides et efficaces étaient également observées lorsque la vision du curseur était retirée durant la seconde portion du mouvement. Ce résultat suggère que très peu d'information visuelle est nécessaire pour détecter et corriger une erreur durant la réalisation d'un mouvement. Les résultats des expériences présentées dans ce mémoire supportent l'existence de mécanismes de

correction d'erreurs rapides, automatiques et fonctionnels. De plus, l'analyse du déroulement temporel des corrections pour les perturbations induites suggère l'intervention d'un mécanisme de contrôle en temps réel 'pseudo-continu' des mouvements d'atteintes manuels.

Mots clés : correction, erreur, planification du mouvement, afférence visuelle, afférence proprioceptive

## Abstract

Recent evidence suggests that the central nervous system uses visual information on line to rapidly and automatically correct for errors in hand displacement. The aim of this study was to explore on line control mechanisms of reaching movements to visual targets. To reach our goal, we evaluated the effect of perturbing the visual feedback of the moving hand on the spatial accuracy of reaching movements to visual targets. Specifically, we introduced a sudden jump in the position of a cursor representing the hand during the movement. Participants moved a cursor presented on a computer screen to one of five possible target locations. For 20% of the trials, the position of the cursor jumped 30 mm to the left (experiment 1) or the right (experiments 2 and 3) of its path early after movement initiation. In the first two experiments, the cursor remained visible throughout the movement. However, in the third experiment, vision of the cursor was withdrawn near mid-flight (approximately 60 ms after the perturbation had occurred). Although participants never perceived the perturbation, they all produced appropriate corrections to compensate for the visual perturbation for the vast majority of trials. Detailed analyses of the time course of the corrections revealed that these corrections were initiated early after the introduction of the cursor jump. Interestingly, rapid and efficient corrections were also observed when cursor vision was withdrawn during the second portion of the movement. This result suggests that very little visual information is needed to detect and correct errors during reaching movements. Results of the experiments presented in this study support the existence of rapid, automatic and functional error-correction mechanisms. Furthermore, the time course of the corrections



for the induced visual perturbation suggests pseudo-continuous online control of reaching movements.

Keys words: correction, error, movement planning, visual afference, proprioceptive afference.

## TABLES DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT.....	vi
TABLES DES MATIÈRES.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ABBRÉVIATIONS.....	viii
REMERCIEMENTS.....	xiii
CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	1
INTRODUCTION.....	2
LA PROPRIOCEPTION.....	3
La désafférentation.....	3
La vibration tendineuse.....	9
La perturbation mécanique.....	10
LA VISION.....	13
La vision statique.....	14
La vision dynamique.....	17
Le temps du traitement des afférences visuelles.....	19
La position de la cible change de place.....	22
La position du curseur change de place.....	24
LA PROBLÉMATIQUE DU PRÉSENT MÉMOIRE.....	27
OBJECTIFS DU MÉMOIRE.....	30
CHAPITRE 2 : ARTICLE.....	32
CHAPITRE 3 : DISCUSSION.....	90
Le temps de mouvement.....	92
La fréquence de la perturbation.....	94
La nature de la correction.....	96

Les corrections sont fonctionnelles.....104  
BIBLIOGRAPHIE.....106

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Vue de l'appareillage utilisé dans les trois expériences.
- Figure 2. Trajectoires du stylet pour des essais perturbés et des essais contrôles pour un participant type. Expériences 1 et 2.
- Figure 3. Position frontale du stylet aux principaux marqueurs cinématiques. Expériences 1 et 2.
- Figure 4. Moment absolu et moment relatif d'occurrence des principaux marqueurs cinématiques. Expériences 1 et 2.
- Figure 5. Coefficients de variabilité en direction et en étendue du stylet aux différents marqueurs cinématiques. Expériences 1 et 2.
- Figure 6. Position frontale et coefficients de variabilité en direction et en étendue du stylet aux différents marqueurs cinématiques. Expérience 3, essais sans correction discrète.
- Figure 7. Moment absolu et moment relatif d'occurrence des principaux marqueurs cinématiques. Expérience 3, essais sans correction discrète.
- Figure 8. Position frontale, moment absolu et moment relatif d'occurrence des principaux marqueurs cinématiques. Expérience 3, essais avec correction discrète.

**LISTE DES TABLEAUX**

Table 1. Position sagittale du stylet aux principaux marqueurs cinématiques. Expériences 1 et 2.

Table 2. Position sagittale du stylet aux principaux marqueurs cinématiques. Expérience 3.

Table 3. Proportion des essais montrant une correction discrète. Expérience 3.

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

ANOVA : analyse de la variance

CDV : coefficient de variation en direction

CEV : coefficient de variation en étendue

Cm : centimètre

Et al. : et collaborateurs

F : F calculé de Fisher

mm : millimètre

ms : milliseconde

s : seconde

SNC : système nerveux central

vs : versus

V : en vision

NV : en non vision

## REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier ma directrice de recherche Julie Messier pour son support pendant toutes mes démarches.

J'aimerais bien remercier mon co-directeur Luc Proteau pour l'effort qu'il a exercé pour que je puisse dépasser plusieurs étapes difficiles dans mes études.

J'aimerais finalement remercier mes parents pour leur encouragement et leur appui.

**CHAPITRE 1**  
**REVUE DE LA LITTERATURE**



## **Introduction**

Les mouvements d'atteinte manuelle sont certainement les mouvements les plus utilisés de notre répertoire. Que ce soit pour saisir un crayon posé sur une table ou pour toucher un commutateur pour allumer les lumières dans une pièce, l'action posée par l'individu est caractéristique des gestes d'atteinte manuelle. Ces gestes, apparemment simples, mettent en jeu une série de processus qui, en réalité, sont très complexes.

Premièrement, l'individu doit localiser la cible convoitée. Si cette cible ne se situe pas directement dans le champ visuel central de l'individu, celui-ci réalisera une saccade oculaire dans sa direction. Suite à une saccade de correction qui permettra de bien fovéaliser la cible, l'individu amorcera son mouvement vers celle-ci. Ce mouvement pourra se terminer directement sur la cible visée, mais dans plusieurs cas une correction sera nécessaire. L'objectif du présent mémoire est de bien cerner la nature des corrections mises en jeu pour que le but visé soit atteint. Ces corrections peuvent être basées sur plusieurs sources d'information différentes. Parmi les plus importantes, il faut considérer la proprioception, la vision et les mécanismes de proaction. Au cours des prochaines pages, nous définirons ces sources d'information et préciserons le rôle traditionnellement associé à chacune d'elles. Cette analyse révélera certains points obscurs ou controversés, notamment en ce qui a trait à certains processus de correction qui prennent place sans que le participant en soit conscient. L'objectif de ce mémoire est d'éclairer un de ces points obscurs. Plus spécifiquement, il s'agit de déterminer si un individu peut corriger un mouvement en cours de réalisation pour tenir compte d'une grande erreur de planification qui ne serait pas consciemment détectée par celui-ci.

## **La proprioception**

La proprioception est une importante source d'afférence pour guider la réalisation des mouvements. La fonction première des propriocepteurs, principalement les fuseaux neuromusculaires, est de renseigner, de façon continue, sur les positions et les déplacements des segments corporels. Lors d'une atteinte manuelle vers un objet d'intérêt, les informations proprioceptives statiques fourniraient des signaux permettant de percevoir la configuration géométrique du bras et, indirectement, d'estimer la position spatiale de la main. Les informations proprioceptives dynamiques, pour leur part, joueraient un rôle prioritaire dans la coordination des mouvements multiarticulaires.

Plusieurs approches expérimentales ont été utilisées afin de déterminer les principales contributions des afférences proprioceptives dans la planification et l'exécution d'atteintes manuelles précises. Une première approche consiste à évaluer la précision et la coordination de mouvements effectués par des patients présentant une désafférentation proprioceptive due à une neuropathie périphérique. Une seconde approche consiste à perturber les signaux proprioceptifs, soit par la vibration tendineuse, soit par l'application d'une charge ou d'un champ de force.

### **La désafférentation**

Les patients présentant des déficits sévères de proprioception consécutifs à une dégénérescence sélective des fibres sensorielles de gros calibre mais dont les fonctions motrices sont intactes présentent plusieurs déficits moteurs. L'étude des conditions particulières dans lesquelles ces déficits moteurs se manifestent a permis de documenter les rôles essentiels des afférences proprioceptives dans le contrôle des mouvements. Par

exemple, certaines études ont démontré que les patients présentant une désafférentation proprioceptive peuvent planifier et exécuter des mouvements isolés des doigts, du poignet ou du coude (Rothewell et al., 1982; Sanes et al., 1985; Forget et Lamarre 1987). Cependant, plusieurs études récentes ont rapporté que, lors de pointages manuels vers des cibles visuelles, ces mêmes patients présentent de grandes erreurs spatiales ainsi que des déficits marqués dans la coordination des déplacements articulaires à l'épaule et au coude. Ces études ont suggéré que les signaux proprioceptifs jouent un rôle critique dans la planification et le contrôle des mouvements multiarticulaires (Gordon et al., 1995).

Les mouvements multiarticulaires présentent des complexités biomécaniques additionnelles pour le système sensorimoteur. Premièrement, lors de mouvements multiarticulaires, la résistance inertielle au déplacement de la main varie en fonction de la direction des mouvements. Elle est maximale pour les déplacements de la main le long de l'axe de l'avant-bras et minimale dans la direction perpendiculaire (Hogan, 1985; Gordon et al., 1994). Par conséquent, l'utilisation d'une même force pour déplacer la main vers des cibles situées dans différentes directions produit des erreurs systématiques d'amplitude qui dépendent de la direction des mouvements (Gordon et al. 1994). La planification et l'exécution d'atteintes manuelles multiarticulaires précises doivent donc tenir compte de ces variations d'inertie. Deuxièmement, lors de mouvements multiarticulaires, les forces générées à une articulation sont, en partie, transférées aux articulations adjacentes. Ce sont les moments de force interarticulaires. Par exemple, lors d'un mouvement de bras vers une cible, les forces produites au niveau des muscles du bras sont transférées à l'avant-bras. Si le système nerveux central ne dispose pas d'un mécanisme pour prédire et contrer ces forces additionnelles, l'avant-bras sera

systématiquement dévié de la trajectoire désirée et de grandes erreurs directionnelles seront observées (Gordon et al. 1994).

Une série de travaux récents ont évalué les contributions sélectives des afférences proprioceptives dans la planification et l'exécution d'atteintes manuelles multiarticulaires. En 1995, Gordon et ses collègues ont évalué la précision de mouvements multiarticulaires effectués par des participants présentant une désafférentation proprioceptive. Les sujets devaient déplacer un curseur vers des cibles visuelles présentées sur un écran d'ordinateur. Aucune vision de la main, ou du curseur la représentant, n'était disponible durant les mouvements. Cependant, la trajectoire de la main était présentée sur l'écran après chacun des essais. En comparaison avec les sujets témoins, les mouvements effectués par les participants désafférentés étaient caractérisés par de grandes erreurs de direction et d'amplitude ainsi que par des trajectoires courbes plutôt que linéaires. En outre, les erreurs directionnelles étaient évidentes dès l'amorce des mouvements suggérant qu'elles reflétaient des déficits dans les processus de planification motrice. D'autre part, les erreurs d'amplitude présentaient une étroite correspondance avec les variations d'inertie. Par conséquent, Gordon et al. (1995) ont conclu qu'en l'absence de vision, les patients sans sensation proprioceptive sont incapables de planifier des mouvements qui tiennent compte des variations d'inertie associées aux différentes directions de mouvement de bras.

Dans une étude subséquente, Ghez et ses collègues (1995) ont vérifié si la vision du bras ou d'un curseur représentant la position de la main améliorait la précision finale d'atteintes manuelles multiarticulaires de sujets témoins et de patients désafférentés. Alors que la vision du bras a produit peu de changement dans la précision des sujets

contrôles, elle a produit des améliorations remarquables chez les patients désafférentés. Lorsque la vision n'était pas obstruée durant les mouvements, une réduction significative des erreurs constantes et variables était observée. Ce résultat indique que les patients désafférentés peuvent utiliser la rétroaction visuelle pour corriger les erreurs de mouvements. Il fut également démontré que la vision du curseur ou du bras avant l'amorce du mouvement permettait de prévenir, au moins en partie, les erreurs dues aux variations d'inertie. Ces dernières ont été encore plus petites dans la condition de vision alternée. Dans cette condition, la vision du curseur ou du bras durant certains mouvements (1/6) a produit une amélioration notable de la précision finale des mouvements subséquents effectués sans vision. Ces résultats ont alors suggéré qu'en l'absence de proprioception, les informations visuelles peuvent permettre la mise à jour d'un modèle interne des propriétés biomécaniques du bras et ainsi favoriser une planification plus précise des mouvements multiarticulaires. Les compensations pour les variations inertielles étaient cependant incomplètes et diminuaient rapidement quand la vision n'était plus disponible. Cette observation suggère que les informations proprioceptives massives qui accompagnent normalement les mouvements de bras sont nécessaires pour maintenir un modèle interne précis des propriétés biomécaniques du bras.

Si cette hypothèse est vraie, les patients présentant une désafférentation proprioceptive devraient également présenter des difficultés dans la planification et l'exécution de mouvements qui tiennent compte des moments de force intersegmentaires. Sainburg et al. (1993) ont vérifié cette hypothèse en comparant les profils spatiaux et temporels de mouvements tridimensionnels de patients présentant une désafférentation

proprioceptive à ceux de sujets témoins. Dans cette étude, les participants devaient effectuer des mouvements répétitifs d'aller-retour du bras afin de mimer un geste similaire à celui de couper du pain. Aucune information visuelle n'était disponible durant les mouvements. Chez les sujets témoins, les trajectoires de la main à l'aller et au retour étaient linéaires et les changements de direction de la main présentaient des angles aigus. À l'opposé, les patients étaient incapables de synchroniser les déplacements angulaires à l'épaule et au coude afin de produire des trajectoires linéaires, et ce particulièrement au moment d'inverser la direction du déplacement de la main. Dans ce geste, les changements rapides de direction de la main sont associés à de grandes accélérations angulaires produisant de grands moments de force intersegmentaires. Sainburg et al. (1993) ont alors proposé que ces déficits dans le synchronisme des mouvements angulaires à l'épaule et au coude reflètent l'incapacité des patients désafférentés de contrôler cet aspect de la biomécanique du bras.

Les effets des moments de force interarticulaires sur la coordination intersegmentaire de mouvements de bras ont été testés plus directement dans une étude subséquente (Sainburg et al. 1995). Dans cette étude, les directions des mouvements étaient sélectionnées afin d'augmenter de façon progressive l'amplitude des rotations articulaires à l'épaule tout en maintenant constante l'amplitude des rotations articulaires au coude. Ainsi, l'ordre de grandeur des moments de force transmis de l'épaule au coude variait de façon systématique au cours des essais successifs. Les résultats de cette étude ont essentiellement reproduit ceux de Sainburg et al. (1993). Ils montrent que les sujets désafférentés sont incapables de coordonner la séquence du travail des muscles du bras et de l'avant-bras afin de produire des trajectoires linéaires et d'inverser rapidement la

direction de la main. De plus, comme il fut démontré pour les erreurs inertielles, les études menées par Sainburg et ses collègues (1993, 1995) démontrent que la vision du bras permet des compensations partielles pour les moments de force intersegmentaires. Par conséquent, même lorsque la vision était disponible, les moments de forces continuaient de produire d'importantes irrégularités dans les trajectoires de mouvement. Ces études démontrent que les afférences proprioceptives sont essentielles à la genèse de compensations précises pour les moments de force générés durant les mouvements multiarticulaires.

Une étude récente permet d'élargir la contribution des afférences proprioceptives dans la coordination intersegmentaire (Messier et al. 2003). Elle montre qu'un patient désafférenté est incapable de contrôler simultanément les déplacements articulaires à l'épaule et au coude afin de produire des mouvements précis et fluides, et ce, à toutes les vitesses de mouvements, c'est-à-dire, que les moments de force intersegmentaires soient grands ou petits. Les résultats de cette étude mettent en relief le double rôle de la proprioception dans le contrôle des mouvements multiarticulaires; procurer des signaux importants pour le contrôle prédictif des moments de force interarticulaires et pour la synchronisation des rotations aux articulations adjacentes même lorsque les moments de force sont très petits.

Ensemble, les données issues des différentes études menées auprès de patients présentant une désafférentation proprioceptive confortent l'hypothèse selon laquelle les afférences proprioceptives sont essentielles au contrôle des complexités additionnelles qui accompagnent les mouvements multiarticulaires.

### La vibration tendineuse

Une autre approche importante permettant d'étudier le rôle des afférences proprioceptives consiste à perturber les signaux proprioceptifs chez des sujets en santé. La vibration tendineuse modifie la décharge des fuseaux neuromusculaires et ainsi provoque des illusions de mouvements. Par exemple, lors d'une atteinte manuelle vers une cible, la vibration du biceps brachial provoque l'illusion que le muscle est allongé et que le bras se déplace plus rapidement menant à une sous-estimation de la cible. La grande majorité des études utilisant cette approche ont porté sur des mouvements monoarticulaires. Elles ont clairement démontré que la perception de la position de la main et de son déplacement est perturbée par la vibration tendineuse (Capaday and Cooke 1981; Inglis and Frank 1990; 1991).

Plus récemment, Verschueren et ses collègues (1999) ont étudié l'effet de la vibration tendineuse sur les caractéristiques spatiales et temporelles de mouvements de bras multiarticulaires. Les sujets devaient dessiner des cercles d'une dimension déterminée à une position précise sur une tablette graphique et sans vision du bras durant les mouvements. Ce geste requiert une étroite synchronisation entre le mouvement du bras et de l'avant bras. Durant ces mouvements répétitifs, les expérimentateurs ont appliqué des stimuli vibratoires soit au tendon du biceps brachial, soit au tendon du deltoïde antérieur ou encore, aux tendons de ces deux muscles simultanément. La vibration de l'un ou l'autre de ces deux muscles avait pour effet de déplacer les cercles dessinés et de réduire leurs diamètres. Cependant, la vibration simultanée de ces deux muscles menait à une déviation significativement plus grande que dans le cas de la vibration d'un seul muscle. En outre, une importante perturbation de la synchronisation



temporelle entre les déplacements angulaires à l'épaule et au coude fut observée dans cette condition. Ces résultats suggèrent que le système nerveux central combine les informations proprioceptives issues des muscles de l'épaule et du coude afin d'assurer la coordination précise des déplacements angulaires des segments du bras et de l'avant-bras. Ces observations confirment le rôle critique des afférences proprioceptives dans la coordination intersegmentaire suggéré par les études de désafférentation proprioceptive.

### **La perturbation mécanique**

Le rôle des afférences proprioceptives dans la coordination intersegmentaire a également été évalué en utilisant une perturbation mécanique, soit par l'ajout d'une charge ou par l'application d'un champ de force. Étant donné que ces perturbations mécaniques sont largement détectées sur la base des signaux proprioceptifs, on considère généralement que les réponses consécutives à ces perturbations renseignent sur le rôle des afférences proprioceptives.

Lacquiniti et Soechting (1984) ont perturbé les mouvements de bras multiarticulaires de sujets en santé à l'aide d'un moteur générant des impulsions de forces et d'un câble attaché au membre supérieur. Ils ont appliqué une charge soit au bras, soit à l'avant bras, puis ont mesuré les changements d'angle articulaire et d'activité musculaire consécutifs à ces perturbations. Étant donné que le bras et l'avant-bras sont mécaniquement couplés, ces perturbations ont toutes deux produit des mouvements angulaires simultanés à l'épaule et au coude. De plus, ces perturbations ont évoqué une variété de réponses électromyographiques (EMG) synergiques au niveau des muscles du bras et de l'avant-bras. Par exemple, la réponse EMG des fléchisseurs du coude à la

perturbation du bras n'était pas uniquement liée à l'amplitude du mouvement angulaire au coude. Plutôt, elle reflétait les mouvements angulaires au coude et à l'épaule. En outre, les réponses EMG observées étaient différentes lorsqu'une perturbation produisait des mouvements angulaires à ces deux articulations dans la même direction ou dans des directions opposées (Lacquaniti et Soechting 1986). Ces observations démontrent que, de façon similaire aux moments de force intersegmentaires se produisant lors de mouvements naturels, lorsqu'une force externe perturbe le mouvement du bras ou de l'avant-bras, un patron de réponses musculaires complexes et coordonnées permet de produire des compensations appropriées afin de guider le mouvement vers l'objectif visé. Ces résultats confirment les évidences de couplage interarticulaire entre l'épaule et le coude trouvées dans les études de désafférentation et de vibration.

Plusieurs autres études ont démontré que l'adaptation à des perturbations mécaniques externes dépend largement des afférences proprioceptives (Sainburg et al. 1999 ; Lackner et Dizio 1994). Dans ces études, des sujets en santé pouvaient amorcer des compensations rapides et appropriées aux perturbations appliquées malgré l'absence d'information visuelle à propos de la trajectoire de mouvement ou de la position finale de la main.

Dans une étude récente, Dizio et Lackner (2000) ont vérifié si des sujets en santé et des sujets aveugles de naissance sont capables d'adapter leurs mouvements de bras à un champ de force coriolis (rotatif). L'expérience se déroulait dans le noir, dans une chambre rotative. Les sujets devaient pointer vers une cible proprioceptive placée à 35 cm de la position de départ et alignée avec la ligne médiane du corps. Trois conditions expérimentales ont été évaluées. Dans la première condition, les sujets se familiarisaient

avec la position de la cible. Aucune perturbation n'était alors appliquée. Dans la seconde condition, les sujets devaient effectuer des mouvements vers la cible alors que la chambre tournait en sens anti-horaire à une vitesse constante de  $60^{\circ}/s$ . Dans la troisième condition, la rotation de la chambre était interrompue, mais les sujets devaient continuer de pointer en direction de la cible. Les chercheurs ont mesuré la linéarité des trajectoires et la précision des positions finales de la main avant, durant et après l'exposition à cette force coriolis.

Les résultats montraient que, avant la perturbation, les trajectoires des deux groupes étaient légèrement courbes et les positions finales étaient relativement précises. Cependant, les trajectoires et les positions finales des essais initiaux effectués durant la rotation de la chambre montraient une déviation systématique dans la direction de la force coriolis. Puis, au cours des essais successifs, les trajectoires étaient de plus en plus linéaires et les positions finales de plus en plus précises. Après seulement 12 essais, la précision des mouvements et la linéarité des trajectoires étaient comparables aux essais qui précédaient la rotation de la chambre. De plus, lorsque la rotation a été interrompue, les trajectoires et les positions finales de la main des deux groupes montraient une déviation systématique dans la direction opposée à la perturbation.

Ces observations démontrent que ces deux groupes pouvaient facilement adapter leurs mouvements aux forces coriolis imposées par la rotation de la chambre. Par conséquent, ces résultats indiquent que l'adaptation à des perturbations coriolis peut prendre place sur l'unique base des informations proprioceptives, même en l'absence complète d'expérience visuelle. Cependant, lorsque les sujets en santé pouvaient visualiser leur bras durant l'exposition à ces forces coriolis, ces derniers montraient une

adaptation complète en utilisant 40% moins d'essais que lorsque ces adaptations sont effectuées sans vision (Siino-Sears et al., 2000). Ces observations supportent les résultats des études de désafférentation menées par Ghez et ses collaborateurs à l'effet que la vision peut permettre la mise à jour d'un modèle interne des propriétés biomécaniques des mouvements de bras (Ghez et al., 1995).

Les différentes études présentées dans ce chapitre démontrent le rôle critique des afférences proprioceptives dans la planification et le contrôle des mouvements multiarticulaires. En outre, elles fournissent de fortes évidences à l'effet que les signaux proprioceptifs sont indispensables à la coordination intersegmentaire. Ces études mettent également en relief les importantes interactions entre la vision et la proprioception dans la genèse et la mise à jour de représentations internes précises de la dynamique des mouvements de bras. La section suivante portera sur les rôles prioritaires de la vision dans la planification et le contrôle d'atteintes manuelles précises.

### **La vision**

La vision est, sans doute, la source d'afférence la plus importante pour assurer la précision du geste moteur. D'une part, elle permet de bien définir la position de la cible à atteindre et sa propre position de départ. Ce sont là les informations visuelles statiques. D'autre part, la vision permet aussi de corriger un mouvement en cours de réalisation, il s'agit alors d'informations visuelles dynamiques.

### La vision statique

La planification de nos gestes nécessite la connaissance préalable de notre position de départ et de l'objectif à atteindre pour la paramétrisation appropriée d'un programme moteur général (Schmidt, 1975). Plusieurs chercheurs (Desmurget, Rossetti, Prablanc, Stelmach, et Jeannerod, 1995; Prablanc, Echallier, Komilis, Jeannerod, 1979; Rossetti, Tadary, et Prablanc, 1994; voir aussi Ghez, 1992; Ghez et al, 1995a, 1995b; Ghilardi, Gordon, et Ghez, 1995) se sont intéressés au rôle des informations visuelles statiques, et plus précisément à celui de la vision de sa main à la position de départ, pour la planification de mouvements de pointage manuel.

Le rôle de l'information statique pour la planification d'un mouvement a d'abord été démontré par Prablanc, et al., (1979). Dans cette étude, le participant devait atteindre les cibles avec sa main droite. Les cibles étaient situées à différentes distances d'un point central situé dans l'axe sagittal du participant. Ce point servait comme base de départ à la main et comme point de fixation pour les yeux. Les participants devaient fixer du regard ce point central et y poser leur index droit. Ensuite, une cible s'allumait. Le sujet devait la regarder et puis l'atteindre le plus rapidement et le plus précisément possible. Dans une première condition expérimentale, la vision de la main était disponible uniquement lorsqu'elle se situait à la base de départ. Dès que le mouvement était amorcé, celle-ci n'était plus visible du participant. Dans une deuxième condition expérimentale, le participant ne voyait jamais sa main, ni sur la base de départ, ni en cours de mouvement. Dans les deux conditions, la cible demeurait visible jusqu'à la fin du mouvement.

La vision de la main à la position de départ a permis de diminuer les erreurs variable et constante de pointage par rapport à l'autre condition expérimentale. Selon ces auteurs,

la vision de la main sur la base de départ permet de mieux identifier cette position que lorsque seule la proprioception intervient. Ceci aurait pour effet une meilleure planification du mouvement. Plusieurs études ultérieures dans lesquelles on utilisait une tâche de pointage naturel (par opposition à virtuelle, comme déplacer un curseur sur un écran d'ordinateur) ont conforté ce résultat. Toutefois, la vision de la main sur la base de départ ne permettait de diminuer que l'une ou l'autre des erreurs constante et variable de pointage (Desmurget, Rossetti, Jordan, Meckler et Prablanc, 1997; Desmurget, et al., 1995; Rossetti, et al., 1994; Vindras, Desmurget, Prablanc et Viviani, 1998).

Une étude récente de Rossetti et al. (1994) supporte bien le rôle de la vision pour définir précisément la position de départ d'un geste d'atteinte manuelle. Les participants devaient pointer vers des cibles visuelles sans pouvoir compter sur l'afférence visuelle dynamique de la main. Avant le début du mouvement, la main du participant était visible à travers un prisme qui créait un déplacement visuel de cette position sans toutefois altérer la position de la cible. Dans une autre condition expérimentale, la vision initiale de la main n'était pas déplacée. Les résultats indiquent que le déplacement virtuel de la position de la main avant le mouvement induisait un biais du mouvement dans la direction opposée à l'orientation du prisme. L'étendue du biais à la fin du mouvement correspondait à 1/3 du déplacement induit par le prisme. Ces résultats montraient l'importance de la vision de la main à la position de départ dans les tâches de pointage manuel. Ils soulignent aussi le rôle important de la proprioception pour la définition de cette position de départ.

D'autres chercheurs (Beaubaton et Hay, 1986; Abahnini et al., 1997) se sont intéressés au rôle de la vision statique de la main à la fin du mouvement. Cette

information joue un rôle de connaissance du résultat, ce qui permet à l'individu d'évaluer l'à-propos de son mouvement. Cette information peut être utilisée pour mieux planifier son mouvement lors d'un essai subséquent. À cet effet, Beaubaton et Hay (1986) demandaient à leurs participants de réaliser une tâche de pointage dans une des cinq conditions suivantes : non vision, vision de la main sur toute sa trajectoire vers la cible, vision de la position statique de la main à la fin du mouvement et vision de la portion initiale ou de la position terminale de la trajectoire du mouvement. Chaque essai était suivi de connaissance du résultat. Dans la condition de vision terminale les résultats indiquaient une meilleure précision spatiale (erreurs variable et constante) que dans les conditions de non vision et de vision initiale. Ceci suggère que la vision terminale permet une meilleure évaluation de la position terminale de la main que la simple connaissance verbale du résultat. Cette information peut ensuite être utilisée pour mieux planifier le prochain mouvement vers cette cible et, éventuellement, vers d'autres cibles (voir aussi Abahnini et al., 1999). Il faut cependant noter que la condition de vision terminale ne permettait pas une aussi bonne précision que lorsque le participant pouvait voir sa main tout au long du mouvement ou dans la deuxième moitié de celui-ci. Ce résultat témoigne du rôle important des informations visuelles dynamiques pour assurer la précision spatiale du geste

Néanmoins, sur la base de travaux réalisés pour déterminer le rôle des informations visuelles statiques pour assurer la précision du geste, on peut conclure que, dans une tâche de pointage naturel, si la main peut être vue avant l'amorce du mouvement, il en résulte des mouvements plus précis ou moins variables que si la main ne peut être vue (voir aussi Bédard et Proteau, 2004). Cela résulterait d'une meilleure identification de la

position initiale de la main qui, en retour, permettrait une meilleure planification et éventuellement un contrôle en temps réel plus efficace (Desmurget et al., 1994) que si seule la proprioception peut être utilisée.

### **La vision dynamique**

Paillard (1980; Paillard et Amblard, 1985) ont proposé l'existence de deux canaux visuels qui joueraient un rôle différencié dans la détection des propriétés spécifiques de l'information visuelle disponible : un canal statique et un canal cinétique. Le canal cinétique serait surtout actif en vision périphérique, ( $> 10^\circ$  d'angle visuel), et serait sensible aux informations visuelles de grande vitesse, soit jusqu'à  $200^\circ/\text{s}$  (Paillard et Amblard, 1985). Dans une tâche d'atteinte manuelle, ce canal permettrait la détection, tôt après l'amorce du mouvement, d'une erreur directionnelle dans sa trajectoire et aussi un éventuel ajustement de cette dernière avant la fin du mouvement.

Selon la proposition de Paillard, le canal statique traiterait l'information disponible en vision centrale, soit entre  $10^\circ$  et  $0^\circ$  d'angle visuel. Il serait impliqué dans le traitement des informations visuelles lentes ( $< 15^\circ/\text{s}$ ; Paillard et Amblard, 1985), comme c'est habituellement le cas lors de la phase terminale d'un mouvement d'atteinte manuelle. Ce canal statique permettrait, en phase finale du mouvement, de réduire l'erreur de positionnement de la main par rapport à la cible. L'existence des deux canaux visuels proposée par Paillard et al., 1985 a reçu de nombreux appuis lors d'études subséquentes.

Dans l'étude de Bard, Hay et Fleury (1985), les participants devaient atteindre des cibles visuelles situées à 30 cm en face d'eux. Ils tenaient un levier dans leur main droite près de leur visage et devaient atteindre les cibles en poussant le levier vers l'avant. La



tâche en était une de balayage (sans arrêt sur la cible) dans laquelle les participants devaient optimiser la composante directionnelle du mouvement sans s'occuper de la composante d'amplitude. Les participants ont réalisé cette tâche dans quatre conditions de feed-back visuel. Selon les conditions, un masque empêchait les participants de voir leur main pendant toute la trajectoire (cible seulement) ou pour la première ou pour la dernière portion du mouvement. Dans la condition de vision complète, la main était visible pendant toute la trajectoire. Les participants devaient compléter leurs mouvements soit en moins de 130 ms ou soit entre 250 et 300 ms. Les résultats indiquent que l'erreur absolue directionnelle était moins grande lorsque la main était visible pour la portion initiale du mouvement que dans la condition cible seulement. Les auteurs ont conclu que la vision périphérique contribuait au contrôle directionnel du mouvement lors de sa réalisation, et ce, même pour des mouvements très rapides.

Ces résultats ont été reproduits dans une série d'études ultérieures (Bard, Paillard, Fleury, Hay et Larue, 1990; Blouin, Bard, Teasdale, et Fleury, 1993; Abahnini, et al., 1997). Cependant, ces résultats n'indiquent pas si les informations visuelles présentes dans la partie initiale du mouvement étaient utilisées pour corriger le mouvement en cours d'exécution ou si elles servent plutôt à mieux planifier un mouvement subséquent.

Bédard et Proteau (2004) voulaient savoir si le fait de voir sa main en vision périphérique et/ou en vision centrale durant l'exécution du mouvement de pointage manuel pouvait être utilisé pour moduler les composantes de direction et d'amplitude de l'impulsion initiale du mouvement. Les participants réalisaient des mouvements de pointage manuel où la vision du curseur était permise soit tout au long du trajet, soit de 40° à 15° d'angle visuel, soit de 15° à 0° de d'angle visuel, ou soit qu'elle n'était pas

permise du tout. Les sujets devaient compléter leurs mouvements à l'intérieur de marges de temps contrôlées qui variaient entre 300 ms et 900 ms. Peu importe le temps de mouvement, les résultats ne révélèrent aucune différence en ce qui a traité la précision ou à la variabilité des points finaux entre la condition 40°-15° et la condition 15°-0° de feedback visuel. Ces deux conditions ont mis en évidence une diminution du biais et de la variabilité des points finaux en comparaison avec la condition de non vision. Comme ces différences étaient déjà observables très tôt après l'amorce du mouvement, ces résultats indiquent que l'information visuelle afférente disponible entre 40°-15° et 15°-0° peut être utilisée pour mieux planifier les mouvements ultérieurs que les seules informations visuelles statiques. Contrairement à la proposition de Paillard (1980; Paillard et Amblard, 1985), ces résultats suggèrent que les deux portions de la rétine, périphérique et centrale, sont capables de détecter les erreurs d'étendue et de direction durant l'exécution du mouvement de pointage, sans qu'il y ait une spécialité de chaque portion de la rétine pour détecter l'erreur d'une composante spécifique du mouvement (voir Khan, Lawrence, Franks, et Buckolz, 2004 pour une conclusion semblable). Dans le cadre du présent mémoire, le point le plus marquant de cette étude est que l'individu est capable de détecter très tôt dans le déplacement de sa main une erreur de planification et de moduler son mouvement en cours de réalisation pour réduire ou éliminer cette erreur.

### **Le temps du traitement des afférences visuelles**

Comme le suggèrent les résultats de Bédard et Proteau (2004), la précision du mouvement de pointage manuel dépend du temps requis pour traiter l'information visuelle afférente. Si le temps alloué lors du mouvement est suffisant pour assurer le

traitement des rétroactions visuelles, on note généralement que le mouvement de l'individu est spatialement très précis. Woodworth en 1899 puis Vince (1948) ont étudié le temps nécessaire pour traiter l'information visuelle dans le contrôle du mouvement de pointage manuel. Ils ont trouvé qu'un délai inférieur à 400 ms ne permettrait pas un contrôle visuel du mouvement. Ce délai relativement long était peut-être dû à la tâche choisie par ces auteurs (mouvements réciproques). Keele et Posner (1968) ont donc décidé de réévaluer ce délai en utilisant une tâche pour laquelle les sujets avaient à produire un mouvement discret vers une petite cible. La vision était disponible de façon prévisible pour cinquante pour cent des essais mais elle était retirée à l'amorce du mouvement pour le reste des essais. Les participants devaient compléter leurs mouvements dans des délais variant de 150 ms à 450 ms (150, 250, 350, et 450 ms). Les résultats indiquaient que pour l'intervalle le plus court (190 ms en moyenne), le fait de retirer ou de ne pas retirer la vision au début du mouvement ne modifiait pas la proportion des essais pour lesquels le participant atteignait la cible. Toutefois, pour le second intervalle (temps moyen de 260 ms), le fait de retirer la vision à l'amorce du mouvement diminuait la proportion des essais complétés sur la cible par rapport aux essais pour lesquels la vision était disponible tout au long du mouvement. La vision jouait donc un rôle important lorsque le temps disponible pour l'utiliser était au moins compris dans l'intervalle 190-260 ms.

Cette diminution dans l'estimation du temps de traitement de l'information et l'impact qu'elle peut avoir sur les modèles théoriques du contrôle moteur a incité plusieurs auteurs à réexaminer ce délai en utilisant différentes procédures. Dans la majorité des cas, la tâche consistait à atteindre une très petite cible, (par exemple, 1 mm),

avec un mouvement unique et discret. Ainsi, plutôt que de simplement calculer la proportion des cibles atteintes dans les différentes conditions expérimentales, les auteurs évaluaient l'écart entre la position de la cible et l'endroit où le participant complétait son mouvement. Le temps de mouvement et les conditions de vision étaient alors manipulés (Bard et al., 1985; Beaubaton et Hay, 1986; Beggs et Howarth, 1970; Carlton, 1981; Georgopoulos, Kalaska, et Massey, 1981; Smith et Bowen, 1980; Zelaznick et al., 1983). Plus récemment, de nombreux chercheurs ont utilisé la cinématique du mouvement pour étudier de façon plus précise la possibilité de l'utilisation de l'information visuelle en cours de mouvement. Les résultats de toutes ces études convergent vers une même conclusion. Le temps requis pour le traitement de l'information visuelle afférente se situe autour de 80 ms à 110 ms. Cependant, toutes les études ont des limites ; soit elles sont basées sur une interprétation des résultats de précision finale et nous informent peu sur les processus mis en cause, soit elles sont basées sur la détection de corrections discrètes (aller-retour, arrêt-poursuite) qui indiquent que le mouvement planifié a été corrigé de façon importante. Une série d'études récentes suggère que des corrections plus fines que celles mises en évidence lors de corrections discrètes sont aussi possibles.

Par exemple, Proteau et Isabelle (2002), ont démontré qu'une modification de la première impulsion du mouvement est possible sur la base des afférences visuelles, même sans changement de la position de l'objectif. Leur conclusion est basée sur l'observation selon laquelle la variabilité de la trajectoire du mouvement diminue considérablement entre le point de décélération et la fin de la première impulsion de mouvement (i.e., avant l'occurrence d'une correction discrète). Puisque cette diminution de variabilité est notée seulement chez les sujets qui ont pratiqué la tâche alors que la

vision dynamique était disponible on peut présumer qu'elle repose sur l'utilisation de l'information visuelle afférente. Plusieurs études récentes ont permis de conforter ce résultat (Bédard et Proteau, 2004 ; Lhuisset et Proteau, 2004 ; Proteau, 2004 ; voir aussi Khan et al., 2002, 2004).

Les résultats de la dernière série d'études indiquent clairement que les informations visuelles, mais aussi proprioceptives, disponibles pendant le déroulement de la première impulsion de mouvement peuvent être utilisées pour moduler cette impulsion, tant en terme de sa composante directionnelle que de sa composante d'étendue. La première modulation semble permettre d'éliminer des erreurs d'approximation lors de la planification du mouvement. Elle est présente peu importe que les informations visuelles dynamiques soient disponibles ou non. Cette modulation est ensuite complétée entre la pointe de décélération et la fin de la première impulsion, mais seulement lorsque les informations visuelles dynamiques sont disponibles ou étaient récemment disponibles (Bédard et Proteau, 2004 ; Proteau, 2004; Robin et al., 2004). Il s'agit maintenant de déterminer si ces modulations permettent uniquement d'éliminer les erreurs de planification du mouvement ou si elles permettent d'éliminer les erreurs fortuites qui ne peuvent être prédites par le participant. Une série d'études récentes permettra de répondre partiellement à cette question.

### **La position de la cible change de place**

Dans une première série d'expériences, Prablanc et ses collègues (Pélisson et al., 1986 ; Goodale et al., 1986) demandaient aux participants de regarder et de pointer le plus rapidement et le plus précisément possible vers des cibles visuelles présentées à des

distances différentes le long d'une ligne frontale. La main n'était pas visible. Pour la moitié des essais la cible demeurait stationnaire. Pour l'autre moitié, la position de la cible était déplacée de 2 cm (Goodale et al., 1986) à droite ou à gauche de sa position initiale durant la saccade oculaire. Comme la position de la cible était modifiée durant la saccade oculaire, ce changement n'était pas perçu par les participants (période de suppression saccadique). Cependant, les participants dirigeaient leurs mouvements vers la position modifiée de la cible, sans que les auteurs notent un changement significatif des profils cinématiques lors des essais perturbés par rapport aux essais non perturbés (i.e., profils de vitesse en cloche unique). Comme ces corrections prenaient place sans évidence de corrections discrètes et sans que le temps de mouvement ne soit augmenté, cela suggère qu'elles correspondent à des ajustements du programme moteur initial plutôt qu'à la mise en place d'un second programme. Par ailleurs, dans une étude semblable (Prablanc et Martin, 1992) les cibles étaient présentées à 20°, 30°, ou 40° de l'axe sagittal médian des participants et à 30 cm d'une position de départ unique. Pour certains essais, des mouvements initialement dirigés vers la cible de 30° devaient être re-dirigés vers l'une ou l'autre des deux autres cibles. Dans cette étude, le changement de la position de la cible impliquait plus qu'une modulation de l'amplitude du mouvement comme dans les travaux précédemment cités, mais une réorganisation plus importante du mouvement (le changement de direction). Encore une fois, les auteurs ont noté que les participants modifiaient leurs mouvements même si le changement de la position de la cible n'avait pas été perçu. Ces ajustements étaient amorcés en aussi peu que 110 ms après l'amorce du mouvement, et donc de la présentation de la perturbation. Tel que souligné précédemment, ce délai correspond bien au délai requis pour amorcer une correction.

Komilis et ses collègues (1993) ont voulu définir l'organisation spatiale et temporelle de la trajectoire du bras de sujets pointant vers une cible dont la position changeait de place soit à l'amorce du mouvement, soit au sommet de la vitesse du mouvement du bras. Les sujets réalisaient leurs mouvements en présence ou non d'informations visuelles dynamiques. La perturbation était perçue par les sujets. Quelque soit la condition visuelle, les résultats ont révélé que les sujets corrigeaient pour l'erreur induite. Lorsque la perturbation survient à l'amorce du mouvement, les sujets en modulent la phase de décélération et compensent pour 88% à 100% de la perturbation induite. Les sujets avaient cependant plus de difficulté à moduler leurs mouvements lorsque la perturbation se produisait plus tardivement. Ils corrigeaient leurs mouvements pour compenser de 20% à 40% de la perturbation induite. Cela n'est pas étonnant puisqu'ils avaient alors moins de temps pour effectuer la correction. Néanmoins, ces résultats suggèrent que l'efficacité du processus de correction n'est pas tributaire de la présence des informations visuelles dynamiques lorsque c'est la position de la cible visée qui est modifiée en cours de mouvement.

### **La position du curseur change de place**

Dans le cadre des études de la section qui précède, c'était la position de la cible à atteindre qui était modifiée durant la saccade oculaire. Or, comme cette saccade n'atteint que très rarement la cible et qu'une saccade de correction est normalement requise, on peut imaginer que, si la programmation finale du mouvement d'atteinte manuelle ne prend place que lorsque la cible est fovéalisée, les processus d'ajustements mis à jour pour les essais perturbés dans ces études sont les mêmes que ceux qui prennent

normalement place pour les essais non-perturbés. Plusieurs auteurs se sont récemment intéressés à un autre type de perturbation. Dans ces études, les participants réalisent une tâche de pointage vidéo comme on le fait dans la vie quotidienne lorsqu'on manipule une souris d'ordinateur. Cette fois-ci, plutôt que de perturber la position de la cible, les auteurs ont modifié la position du curseur représentant le déplacement de la souris, soit à l'amorce du mouvement, soit une fois que celui-ci était amorcé. Cette perturbation causait une translation du curseur vers l'avant, l'arrière, la gauche ou la droite de sa position réelle.

Bédard et Proteau (2003) modifiaient la position du curseur déplacé par le participant de 12.5 mm ou de 27.5 mm à gauche ou à droite de sa position initiale, et ce dès l'amorce du mouvement. Les participants devaient déplacer ce curseur de 32 cm dans une fenêtre temporelle comprise entre 200 ms et 380 ms. Moins de 20% des essais étaient perturbés, ce qui rendait la perturbation imprévisible et mimait une situation pour laquelle une erreur fortuite de planification du mouvement aurait pris place. Les participants réalisaient les mouvements dans l'une des trois conditions visuelles suivantes : la position de la main était visible durant tout le trajet, ou entre 40° (position de départ) et 15° de l'angle visuel, ou seules les informations visuelles statiques étaient présentées. La perturbation n'était pas perçue consciemment par les sujets et les résultats ne montraient aucune évidence de correction de la perturbation induite.

Saunders et Knill (2003) ont fait une étude où des perturbations inopinées intervenaient dans un tiers des essais. Cette perturbation se produisait lorsque le curseur était rendu à 25% ou 50% de la distance totale à parcourir. La perturbation déplaçait le curseur de 2 cm et prenait graduellement place sur une distance de 5 cm. Cette dernière



caractéristique diminue la probabilité qu'elle soit perçue consciemment par les participants. Finalement, les participants devaient compléter leur mouvement dans un temps de mouvement moyen de 450 ms (condition rapide) ou de 600 ms (condition lente). Même si les participants n'ont pas perçu consciemment la perturbation induite, les résultats indiquent qu'ils ont corrigé leur mouvement pour en tenir. Cette correction était amorcée 160 ms après le début de la perturbation. À la fin du mouvement, les perturbations étaient corrigées pour près de 100% de la perturbation induite. Cependant, Saunders et Knill (2003) ont démontré que cette correction ne prenait pas uniquement place à la toute fin du mouvement par le biais d'une correction discrète. Lorsque seule la première impulsion de mouvement était considérée, dans le cas de la perturbation survenant à 25% de la distance à parcourir, la correction correspondait à 59% de l'erreur induite pour le mouvement rapide et à 73% de l'erreur induite pour le mouvement lent. Quant à la perturbation survenant à 50% de la distance parcourue, cette perturbation était corrigée de 45% ou de 62% lors de la première impulsion de mouvement pour les mouvements lents et rapides, respectivement.

Les résultats rapportés par Saunders et Knill (2003) ont récemment été reproduits par Sarlegna et al. (2004). Dans cette étude, les participants devaient déplacer le plus rapidement et le plus précisément possible un manipulandum d'une position située près de leur corps vers des cibles situées devant eux. La pointe du manipulandum était sertie d'une matrice de diodes. Le participant devait pousser le manipulandum devant lui pour faire en sorte que la diode allumée passe directement sous la cible à atteindre. La tâche était réalisée alors que le participant ne pouvait voir que la cible à atteindre et la diode allumée. Au cours de l'essai, soit lors de la saccade oculaire vers la cible, la diode

allumée au départ de l'essai était éteinte et une autre diode de la matrice était allumée à sa place. L'amplitude de la perturbation variait entre 1 et 4 cm vers la gauche ou vers la droite. Les résultats ont révélé que même pour un temps de mouvement très court (328 ms pour une amplitude de 44 cm), les participants ont corrigé leur mouvement pour tenir compte de 45% de la perturbation imposée. Les auteurs sont cependant muets quant à la nature de la correction apportée (correction discrète ou modulation de l'impulsion initiale de mouvement).

### **La problématique du présent mémoire**

Les résultats des études de Bédard et Proteau (2003) et de Saunders et Knill (2003) suggèrent qu'une correction ne peut pas être effectuée lorsque les participants exécutent un mouvement très rapide, mais qu'une telle correction est possible lors de mouvements plus lents. À première vue, les résultats présentés par Sarlegna et al. (2004) contredisent cette conclusion. Cependant, dans cette dernière étude, le critère utilisé pour déterminer l'amorce d'un mouvement était très conservateur (le manipulandum atteint une vitesse de 300 mm/s) ce qui mène à une sous-estimation de près de 100 ms du mouvement par rapport au critère utilisé par Bédard et Proteau (2003 ; i.e., 10 mm/s). De plus la fin du mouvement était déterminée lorsque le manipulandum franchissait la position de la cible. Le participant n'avait pas à s'arrêter sur la cible comme dans les autres études, ce qui avait pour effet une grande sous-estimation du temps de mouvement.

Une autre différence potentielle entre les études de Bédard et Proteau (2003) et celles de Saunders et Knill (2003) et de Sarlegna et al. (2004) porte sur la fréquence des perturbations. Cette fréquence était de 20%, 33% ou 100%, respectivement. Il se pourrait qu'une fréquence plus élevée d'essais perturbés engendre une correction plus

efficace du mouvement. À cet égard, dans un type de tâche différent, Abbs et Gracco (1982) ont remarqué que si la fréquence des essais perturbés mécaniquement dans une tâche de phonation dépassait 15-20% les participants modifiaient leur comportement (durcissement des lèvres) pour atténuer les effets de la perturbation. Il semble donc avantageux de diminuer la fréquence des essais perturbés pour éviter de tels comportements anticipatoires. Qui plus est, lorsque la fréquence des perturbations est très élevée, particulièrement lorsque cette perturbation diffère d'un essai à l'autre, il arrive très souvent que le participant constate que ce qu'il est en train de faire ne correspond pas à ce qu'il avait planifié de faire. Dans une telle situation, il est plausible que le participant adopte une stratégie qui favorise la correction de son mouvement, puisqu'il arrive souvent que celui-ci ne corresponde pas à ce qu'il avait planifié. Cette situation est probablement typique de comportements novices. Au contraire, lorsque la fréquence des perturbations est peu élevée, cette dissociation entre ce qui a été planifié et ce qui est réalisé apparaît comme étant plus fortuite et permet d'étudier comment un système expert réagit à des erreurs inattendues de planification. Les résultats de Bédard et Proteau (2003) pourraient ainsi suggérer qu'un système expert a de la difficulté à compenser pour une erreur de planification qui s'apparente à du bruit dans le système. À cet égard, il devient important de vérifier si la qualité des corrections à des perturbations inopinées se modifie en fonction de la pratique. Saunders et Knill (2003) réfutent cette possibilité en démontrant, sur la base de données très fragmentaires, que les participants à leur étude compensaient tout aussi bien pour les perturbations se produisant au début qu'à la fin de la séance expérimentale. Toutefois, compte tenu de la fréquence relativement

élevée des perturbations et du caractère partiel des données sur lesquelles ils s'appuient le problème reste entier.

L'observation à l'effet que seulement des corrections partielles ont été observées lorsque des mouvements relativement lents étaient réalisés (Sarlegna et al., 2004) ; lors de la première impulsion de mouvement pour Saunders et Knill, 2003) peut avoir deux origines qui ne sont pas mutuellement exclusives. D'une part, cela peut indiquer que la contrainte de temps a fait en sorte que les participants n'ont pas eu le temps nécessaire pour compléter la correction amorcée. D'autre part, cela peut indiquer que la correction amorcée est modulée par les afférences proprioceptives. En effet, lorsque la position du curseur vue par le participant est déplacée, il y a décorrélation entre les afférences proprioceptives et les afférences visuelles. Il se peut donc que le SNC ne permette pas une décorrélation trop grande, du moins tant et aussi longtemps que le curseur manipulé et la cible visée ne sont pas visibles en vision centrale.

Finalement, comme il a déjà été souligné, Saunders et Knill (2003) ont démontré qu'une partie importante de la correction prenait place sous la forme d'une correction discrète qui se produisait tardivement alors que le curseur atteignait le périmètre immédiat de la cible. La nature des informations à l'origine de cette correction discrète est cependant inconnue. D'une part, il se peut que cette correction discrète soit basée sur une comparaison, via les afférences visuelles, de la position du curseur en fin de mouvement à la position de la cible. Cette éventualité suggère que les limites de décorrélation entre les afférences visuelles et proprioceptives abordées ci-haut sont éliminées lorsque le curseur et la cible sont vues en vision centrale. Les études de déviation prismatiques de la vision supportent cette proposition (Rossetti et al., 1994).

D'autre part, il se peut aussi que la correction discrète qui est effectuée ait été planifiée sur la base des informations visuelles disponibles en vision périphérique. Dans une telle perspective, il faudrait alors que le SNC ait pu déterminer que la perturbation imposée ne puisse pas être entièrement corrigée par une modulation de l'impulsion initiale de mouvement et ait alors planifié une impulsion de correction. À notre connaissance, une telle possibilité n'a jamais été considérée.

### **Objectifs du mémoire**

Les objectifs du présent mémoire étaient de préciser comment le SNC corrige une erreur fortuite de planification du mouvement. Pour ce faire, nous avons réalisé une série d'expériences au cours desquelles les participants réalisaient une tâche de pointage vidéo pour laquelle la position du curseur manipulé a été perturbée pour une faible proportion des essais alors que ce curseur était vu en vision périphérique. Afin d'éliminer la possibilité que seules des corrections partielles ne soient effectuées à cause d'une limite temporelle, les participants devaient compléter leur mouvement en 800 ms. De plus, les participants réalisaient 280 essais expérimentaux, ce qui permettait de suivre l'évolution éventuelle des corrections en fonction de la pratique. Finalement, afin de vérifier si les corrections discrètes observées par Saunders et Knill (2003) étaient basées sur une comparaison via les afférences visuelles de la position du curseur en fin de mouvement à la position de la cible ou si elles avaient plutôt été planifiées sur la base des informations visuelles périphériques pour compenser une limite éventuelle de la modulation de la première impulsion de mouvement, pour une expérience le curseur est devenu invisible très rapidement après la mise en place de la perturbation. La première possibilité soulevée ci-haut serait vérifiée si nous n'observions pas de corrections discrètes ou

observations des corrections discrètes très imprécises contrairement aux études dans lesquelles la vision du curseur demeure possible jusqu'à la fin du mouvement. La deuxième possibilité sera retenue si la fréquence et la précision des corrections discrètes demeureraient les mêmes peu importe que le curseur reste visible jusqu'à la fin du mouvement ou qu'il devienne invisible peu après l'introduction de la perturbation.

**CHAPITRE 2**  
**L'ARTICLE**

Online control of video-aiming movements:  
Fast and efficient corrections of undetected experimentally-induced errors

Luc Proteau, Adel Al Roujoula, Julie Messier  
Département de kinésiologie  
Université de Montréal

Corresponding author:

Luc Proteau, Département de kinésiologie, Université de Montréal, P.O. Box 6128,  
Station Downtown, Montréal, Canada, H3C 3J7.

Short title

Visual control of video-aiming movements



### Abstract

We investigated how dynamic visual afferent information was used for the correction of experimentally-induced aiming errors. We wanted to determine the time course of these corrections and whether dynamic visual afferent information was required to optimize them once they had been initiated. Participants moved a cursor shown on a computer screen towards one of many possible target locations. For 20% of the trials, the position of the cursor jumped 30 mm to the left or right of its path early after movement initiation. For some trials, the cursor remained visible throughout movement execution whereas for other trials it was blanked near mid-flight (approximately 60 ms after the perturbation had occurred). Participants never perceived the perturbation but corrected for it for a vast majority of the trials. These corrections were as efficient regardless of whether the cursor remained visible or was blanked out around 60 ms after the cursor jump. These results show that one needs very little visual information to detect deviation in the trajectory of his or her movement and to correct it appropriately, at no temporal cost. The time course of these corrections suggests that visual afferent information is processed continuously as movement unfolds. Continuity in the error correction capabilities appears possible to correct for noise in movement planning processes but breaks down when faced with large planning errors or very high level accuracy requirements.

### Online control of video-aiming movements:

Fast and efficient corrections of undetected experimentally-induced errors

It has long been thought that manual aiming movements were made up of two distinct phases (Woodworth, 1899; see also Meyer et al., 1988). A first “ballistic” phase (i.e., the movement’s primary impulse) that would bring the hand close to the target area and a second “current control” or feedback phase. In this latter phase, the gap between the hand and the target would generate an error signal that could be used to plan a corrective submovement ( a discrete correction) and bring the hand on the target through a closed-loop process. Because the first phase was considered to be ballistic, it was thought that it could not be modified or modulated online to correct for initial error/noise in movement planning. Recent evidence questions this position, however. Specifically, it has been proposed that visual afferent information from the moving hand was processed in a continuous fashion to ensure endpoint accuracy of manual and video-aiming movements. This position is based on two independent series of observations.

First, if one accepts that movement planning processes take place over a noisy background (Meyer et al., 1988; Schmidt et al., 1979), the output of these processes (i.e., the movement’s primary impulse) should result in a predictable pattern of spatial variability as movement progresses toward the target. For example, early after movement initiation (i.e., at the occurrence of peak acceleration) a movement could be biased to the left of the target. In Cartesian space, the deviation from a reference vector (that joining the center of starting base and the center of the target) should be relatively small. If movement progresses uncorrected, the gap in Cartesian space between the reference vector and the actual movement trajectory should increase. This leads to the prediction

that, if a series of movements only reflect the outcome of response planning processes, and therefore that the primary movement impulse is ballistic, the within-participant variability in Cartesian space of the position reached at any given moment for this series of movements should increase linearly as movement progresses towards the target. A reduction in the rate of increase of within-participant variability as a function of movement extent would reflect a modulation of the movement initial impulse or, in other words, evidence of online control processes. The results of a series of recent studies (Khan et al., 2002, 2004; Lhuisset and Proteau, 2002, 2004; Proteau, 2004; Proteau and Isabelle, 2002) showed a reduction in movement variability between the occurrence of peak extent deceleration and the end of the movement's primary impulse when dynamic visual afferent information was available. This observation strongly suggests that the movement's primary impulse is not ballistic in that it could be modulated online to eliminate noise in the planning processes, which would have lead to large aiming errors.

Second, in another series of recent studies, participants performed video-aiming movements, much like moving a cursor shown on a computer screen. For some trials, the trajectory of the cursor was perturbed- for example a 2 cm translation- relatively soon after movement initiation (i.e., a cursor jump). Although this cursor jump was not detected by the participants, they quickly and accurately modified the trajectory of their movements, which ended close to the target. Because these corrections were apparent even for the first perturbed trials of a series, and because the time required to initiate them was independent of where the perturbation took place, it was concluded that the movement was under continuous visual control (Saunders & Knill, 2003; 2004; see also

Sarlegna et al., 2003, 2004). Thus, the primary movement impulse does not appear to be ballistic.

These two series of studies have some important limitations if one wants to use them to infer that manual aiming or video-aiming movements are under continuous visual control. The observation that a decrease in the variability of movement trajectories was observed late in the movement's primary impulse could still be interpreted as evidence that a fair proportion of this primary impulse was under the control of open-loop processes. Also, this reduction in variability past the occurrence of peak extent deceleration could be limited to a modulation of this primary impulse to reduce noise inherent to movement planning processes. If one wants to argue about continuous control, one has to show that this modulation is also effective for movements that strongly deviate from the intended movement path or, put into other words, for planning errors. Such large corrections have been observed in the cursor-jump experiments. However, the time course of the corrections initiated to compensate for a cursor jump remains largely unknown. It is not clear whether the corrections resulted from a modulation of the movement primary impulse, which is necessary to argue that dynamic visual afferent information is processed continuously, or were the results of discrete corrections occurring when the cursor and the target were seen relatively close to each other. In the latter case, one could still argue that at least the initial portion of the movement's primary impulse is impervious to correction.

The first goal of the present study was to determine whether the primary impulse of a video-aiming movement could be modulated to compensate for a cursor-jump perturbation. In that regard we also wanted to determine the exact time course of this

modulation and determine whether it is implemented only when the cursor and the target are relatively close to each other. Further, recent results reported by Körding and Wolpert (2004) suggest that visual control of one's movement need not be continuous to be efficient. They used a video-aiming task for which displacement of the cursor on the screen was translated on each trial (mean translation of 1 cm , standard deviation: 0.5 cm). Displacement of the cursor was visible only for 100 ms at mid-flight and still participants corrected their movement for the cursor jump. Although these results indicate that a brief sample of dynamic visual afferent information is sufficient for participants to evaluate the modified trajectory of the cursor and to implement appropriate corrective actions, it is not clear whether continuous availability of dynamic visual afferent information would have resulted in better correction for the cursor jump- an important condition to meet to argue for the continuous visual control of one's movement .

## Materials and General Methods

### Participants

Twenty-eight participants took part in this study. Their mean age was 21 years (range 20-25 years). All participants reported normal or corrected to normal vision.

Participants took part in a single forty-minute experimental session and were paid \$10 CDN for their time. The local Ethics Committee has approved this study.

### Task and apparatus

The task was a video-aiming task in which the participants move a computer's mouse-like device to displace a cursor shown on a computer screen from a fixed starting position towards one of five possible targets. The apparatus is illustrated in Figure 1. It consisted of a table, a computer screen, a mirror, and a two-degrees of freedom manipulandum. Participants sat in front of the table. The computer screen (Mitsubishi, Color Pro Diamond 37 inches) was mounted on a ceiling-support positioned directly over the table; the computer screen was oriented parallel to the surface of the table. Its image was reflected on a mirror placed directly beneath it and also parallel to the tabletop. The distance between the computer screen and the mirror was 20 cm while the distance between the mirror and the tabletop was 16 cm permitting free displacement of the manipulandum on the tabletop. The information presented on the computer screen was thus reflected on the mirror and was easily visible to the participant. The mirror also prevented participants from seeing their arm and hand during the experiment.

---

Insert Figure 1 approximately here

---

The tabletop was covered by a piece of Plexiglas over which a starting base and the manipulandum were affixed. A thin strip of Plexiglas glued to the tabletop defined the starting position. It was located 4.5 cm away and parallel to the leading edge of the table. The strip of Plexiglas had a small indentation on its distal edge (relative to the participant). The indentation was located directly in line with the frontal center of the computer screen and the participant's midline (see Figure 1) and served as the starting base for the stylus (see below). It made it easy for the participant to position the manipulandum at the beginning of each trial. The manipulandum consisted of two pieces of rigid Plexiglas (43 cm) joined together at one end by an axle. One free end of the manipulandum was fitted with a second axle encased in a stationary base. The other free end of the manipulandum, hereafter called the stylus, was fitted with a small vertical shaft (length: 3 cm, radius: 1 cm) that could be easily gripped by the participant. From the participant's perspective, the far end of the manipulandum was located 40 cm to the left of the starting base and 70 cm in the sagittal plane. Each axle of the manipulandum was fitted with an optical shaft encoder (U.S. Digital, model S2-2048, sampled at 500 Hz, spatial accuracy  $0.044^\circ$ ), which enabled us to track the displacement of the stylus on-line and to illustrate it with a 1:1 ratio on the computer screen. Displacement of the stylus resulted in an identical and superimposed displacement of the cursor on the computer screen. The bottom of the stylus and the bottom of the optical encoder located at the junction of the two arms of the manipulandum were covered with a thin piece of Plexiglas. By lubricating the working surface at the beginning of each experimental session, displacement of the stylus was near frictionless.

## Procedures

Participants were asked to try stopping the cursor on a target having a diameter of 8 mm. Five targets were used; they were black and presented on a white screen. The first target was located 320 mm directly in front of the starting base (or at  $44.1^\circ$  of visual angle from it). The remaining four targets formed the corners of a square having a side of 12 cm and centered on the first target. The two farther targets were located at  $49^\circ$  of visual angle from the starting base, whereas the closer two targets were located at  $39.1^\circ$  of visual angle from the starting base.

A target was presented 500 ms after the stylus had been immobilized on the starting base. Participants were asked to gaze at the target and then to initiate their movement as they pleased (not a reaction time task). Participants were asked to look at the target at all times during movement execution (their natural behavior; Bédard & Proteau, 2001, 2004; McIntyre et al., 1997; Saunders & Knill, 2003) and to complete their movement in a single motion (i.e., no stop and go) and in a movement time ranging between 720 ms and 880 ms (800 ms  $\pm$  10%). When movements were completed outside this movement time bandwidth, the experimenter reminded the participant of the target movement time. A similar procedure has also been used by Saunders and Knill (2003).

Participants were randomly assigned to Experiments 1 ( $n = 9$ ), 2 ( $n = 10$ ), and 3 ( $n = 9$ ). In Experiments 1 and 2, vision of the cursor was permitted throughout the movement. Participants performed 11 familiarization trials followed by 250 experimental trials. The order of target presentation was randomized with the restrictions that each target was presented ten times in each successive block of 50 trials, and that perturbed trials were separated by at least three unperturbed trials. At the beginning of each trial,



all participants could see the cursor they had to move resting on the starting base, as well as the target to be reached. Within each successive block of 50 trials, 40 trials were unperturbed and a cursor jump occurred for 2 trials per target. Two control trials were randomly selected for each target within each successive block of 50 trials. The control trials were not immediately preceded by a perturbed trial. The target jump occurred soon after movement initiation for all targets. Specifically, it occurred once the cursor had traveled 5.2 cm, 7.8 cm or 10.5 cm for the closer, central, and farther targets respectively, or was located at 25.9°, 25.1°, or 24.8° of visual angle from the closer, central, and farther targets, respectively. In all cases (see Figure 1), the perturbation consisted of the cursor instantaneously jumping to the left (Experiment 1: In Cartesian coordinates 28.8 mm to the left and 5.5 mm backwards) or to the right (Experiment 2: 28.8 mm to the right and 5.5 mm forward). At the end of each trial, participants could see where the stylus had stopped in relation to the target.

In Experiment 3, participants completed 11 familiarization trials followed by 320 experimental trials. Only the four corner targets used in Experiments 1 and 2 were used. For each consecutive block of 40 trials, there were 32 unperturbed trials and 8 perturbed trials (2 perturbed trials per target). For half of the perturbed trials, the cursor remained visible throughout the movement (cursor jump-V trials) or was blanked (cursor jump-NV trials) as soon as it had reached the mean location of occurrence of peak extent velocity in Experiment 2. For the two closer targets, this occurred at 96 mm sagittally from the starting base. It occurred at 148 mm from the starting base for the two farther targets. Thus, the jumped-cursor was visible for 36 mm and 43 mm for the closer and farther

targets, respectively, or between approximately  $25^\circ$  of visual angle and  $15.8^\circ$  and  $17.5^\circ$  of visual angle for the closer and farther targets, respectively.

#### Data reduction and statistical analysis

To provide a quick feedback to the participant, during acquisition movement initiation was detected once the stylus had been moved by 1 mm. However, for the main analyses, movement initiation was defined as the moment at which the velocity of the cursor reached 10 mm/s, whereas movement was deemed to be completed when the cursor was not displaced by more than 2 mm in a time frame of 500 ms. The different procedures used to detect movement initiation during acquisition and in the main analyses explains why the movement times to be reported below are longer than the target movement time used during acquisition. It should be remembered that the movement time bandwidth was used only to eliminate the possibility of different speed-accuracy trade-offs between the different experimental conditions (Fitts, 1954).

Endpoint direction and extent errors were computed in Cartesian coordinates, in relation to the center of the target. The direction error was the signed difference on the frontal axis (in mm) between the movement endpoint and the location of the target. A positive value indicates a movement ending to the right of the target, whereas a negative value indicates a movement that ended to the left of the target. The extent error of a trial was defined as the signed difference between movement endpoint and the target in the sagittal axis. A positive value indicates that the target had been overshoot and a negative value that it had been undershot (see Figure 1). From these data, we computed the constant and variable aiming errors on the extent and on the direction dimensions of the task. The constant error indicates whether participants showed a bias in their movements

(too long, too short, to the right or to the left of the target) whereas the variable error is a measure of within-participant variability.

In addition, key kinematic variables were also analyzed. To this end, the displacement data of the stylus over time on both the frontal and the sagittal axes were first smoothed using a second order recursive Butterworth filter with a cutting frequency of 10 Hz. The filtered data were then numerically differentiated once using a central finite technique to obtain the velocity profile of the aiming movement, a second time to obtain the acceleration profile, and a third time to obtain a jerk profile. The end of the movement's primary impulse was defined as when one of the following events was detected on the kinematic profiles: (a) movement reversal (velocity going from positive to negative), (b) movement lengthening (presence of a secondary movement impulse as indexed by the acceleration profile crossing the zero value for a second time) or (c), a significant disruption in the deceleration profile as indexed by zero-crossing on the jerk profile. For a secondary movement impulse to be considered as a discrete correction, its duration had to be of at least 80 ms and its extent had to be of at least 2 mm.

For all three experiments, endpoint constant and variable errors and movement time data were analyzed in independent ANOVAS contrasting Target location (5 in experiments 1 and 2 and 4 in experiment 3) and Type of trials (experiments 1 and 2: cursor-jump and control trials; experiment 3: cursor jump-V, cursor jump-NV and control trials) with repeated measurements on both factors. In all three experiments, data concerning the time course of the correction were submitted to independent ANOVAS contrasting Movement direction (left or right), Target distance (closer or farther), Type of trials (as defined above), and Kinematic landmarks (peak acceleration, peak velocity,

peak deceleration and end of the movement's primary impulse; a fifth marker was included -movement endpoint- for trials showing a discrete correction), with repeated measurements on all four factors. Note that for the latter set of analyses, the central target data were not analyzed in experiments 1 and 2. All significant interactions were broken down into their simple main effects. All significant main effects and simple main effects involving more than two means were broken down using the Tukey HSD technique. All effects are reported at  $p < .05$ , after having been adjusted for the number of comparisons (Bonferonni's technique).

#### Results: Experiments 1 and 2

Target jump was not perceived. In both experiments 1 and 2, even after having been debriefed, no participants reported having perceived a target-jump. On very few occasions, some participants commented on the "poor" orientation of the initial portion of their movement, but were never aware that it could have resulted from our experimental manipulation. This aspect of the results supports previous findings in cursor-jump experiments (Bédard & Proteau, 2003; Saunders & Knill, 2003, 2004) even when a cursor jump occurred on every single trial (Sarlegna et al., 2003, 2004).

#### Cursor jump trials elicited a movement correction in the vast majority of trials: endpoint data

Movement trajectories of typical participants are illustrated in Figure 2 for control trials and for left and right (experiments 1 and 2, respectively) cursor-jump trials. This figure illustrates that these participants corrected their movements at least partially for the cursor-jump; moreover, these corrections began soon after the introduction of the perturbation. The results of the endpoint constant direction (see Figure 3-end) and extent

errors (see Table 1) of all participants revealed that these corrections significantly differentiated movement endpoints of control and cursor-jump trials. Specifically, in experiment 1, participants ended their movement significantly more to the right of the targets for the cursor-jump than for the control trials (mean difference of 20.2 mm),  $F(1, 8) = 396.10$ . In addition, they also produced longer movements for the cursor-jump than for the control trials, (see table 1),  $F(1, 8) = 251.1$ . Similarly, in experiment 2, participants ended their movement significantly more to the left of the target for the cursor-jump than for the control trials (mean difference of 22.6 mm),  $F(1, 9) = 221.05$ ; cursor jump trials were also significantly shorter than control trials, (see table 1),  $F(1, 9) = 55.92$ .

---

Insert Figures 2 and 3 and Table 1 approximately here

---

The results of movement endpoint variability did not differ much as a function of the type of trials. In experiment 1, direction endpoint variability was significantly larger for the cursor jump than for the control trials for the two closer and the central targets (4.37 mm vs. 3.13 mm), but not for the two farther targets (4.12 mm vs. 4.0 mm),  $F(4, 32) = 4.6$ . Direction endpoint variability did not differ significantly as a function of the type of trials in Experiment 2 ( $p > .20$ ), nor did extent variable error differ significantly as a function of the type of trials in either experiment 1 or experiment 2 ( $p > .20$  in both experiments). Taken together with the results illustrated in Figure 2, this suggests that participants modified the trajectory of their movements for a very large proportion of the cursor jump trials. This position is further supported by the observation that 95% and 97% of the cursor jump trials ended more than one standard deviation to the right or to

the left of the mean endpoint location of the control trials in experiment 1 and 2, respectively.

Online compensations for the cursor jump took place at a very low temporal cost. As illustrated in Figure 4A, movement time was only slightly longer for the cursor jump than for the control trials (experiment 1: 990 ms vs. 964 ms; experiment 2: 980 ms vs. 955 ms). Finally, but not surprisingly, movement time was significantly shorter for the two closer targets than for the central target which in turn had a significantly shorter movement time than the farther targets (experiment 1: 914 ms, 982 ms, and 1050 ms, respectively; experiment 2 (905 ms, 967 ms, and 1025 ms, respectively),  $F(4, 32) = 123.9$  and,  $F(4, 36) = 223.1$ , respectively).

---

Insert Figure 4 approximately here

---

#### Two patterns of movement correction for cursor jump trials

The results of the preceding section indicate that the vast majority of the cursor jump trials were corrected at least to some extent and at a very low temporal cost. In the present section, we examine whether this occurred through discrete correction(s) or through a modulation of the movement's primary impulse. We computed independently the proportion of trials showing a discrete correction on either the sagittal or the frontal axes. A discrete correction was defined as a movement reversal, a secondary movement impulse or a significant modification in the deceleration profile of the movement's primary impulse (see method for details).

On the extent component of the task, no participant showed more than 4% of these corrections regardless of the types of trial or target considered. This is very much in keeping with a series of recent studies using the same apparatus and similar experimental protocols (Bédard & Proteau, 2003; 2004; Lhuisset & Proteau, 2004; Proteau, 2004).

On the frontal component of the task, we observed very different patterns of results depending on the location of the target. In experiment 1, when participants aimed to targets located to the right of their midline, we observed less than 5% of discrete corrections for the perturbed trials, which did not differ significantly from the control trials. However, when participants aimed to targets located to the left of their midline, 89% of the perturbed trials showed a discrete correction, whereas there were less than 5% of the trials showing a discrete correction for the control trials. For the central target, there was 6.7% of trials showing a discrete correction for the perturbed trials in comparison to 35% for the control trials. This general pattern of results was reversed in experiment 2. When participants aimed at targets located on the right of their midline, 72% of the perturbed trials showed a discrete correction in comparison to less than 5% for the control trials. In contrast, when participants aimed to the left of their midline, the proportion of perturbed trials showing a discrete correction decreased to 16%, which nonetheless, is larger than the proportion observed for the control trials (< 2%). Finally, for the central target, as in Experiment 1, there were 7% of trials showing a discrete correction for the perturbed trials whereas 44% of the control trials showed a discrete correction for this target. These results are supported by significant types of trials x target location interactions,  $F(4, 32) = 42.97$  and  $F(4, 36) = 28.28$ , for experiments 1 and 2, respectively.

### Modulation of the movement's primary impulse on the extent component of the task

We have already shown that movement extent was significantly longer for the cursor jump than for the control trials in experiment 1, whereas cursor jump trials were significantly shorter than control trials in Experiment 2. In both cases, the endpoint extent bias shown by the cursor jump trials was opposite and of a size corresponding to that of the cursor jump for this dimension of the task. Thus, participants corrected their movements on this dimension of the task without showing any evidence that it was the result of a discrete correction. It is worth noting that this very small perturbation, which represented on average 2.1% of total cursor displacement, was corrected quickly and efficiently. To study the nature of this correction, we determined the location of occurrence of peak extent acceleration, velocity, deceleration, and movement endpoint of all trials and contrasted them as a function of the target location and of the type of trials. The results of interest are presented in Table 1.

In both experiments 1 and 2, the location of occurrence of peak sagittal acceleration and velocity did not significantly differ between the cursor jump and the control trials. However, in all but one case (experiment 1, left targets), peak sagittal deceleration occurred significantly closer to the starting base for the cursor jump than for the control trials. This "spatial" lag for the cursor jump trials in comparison to the control trials occurred even in experiment 1 for which movement endpoints of the cursor jump trials overshot that of the control trials. In addition, in experiment 2, this lag was three times larger at the occurrence of peak sagittal deceleration than at movement endpoint. Finally, movement was adjusted to compensate for this lag between peak sagittal deceleration and movement endpoint. These observations are supported by significant Type of trials x



Direction x Kinematic landmarks interaction,  $F(3, 24) = 26.0$  and  $F(3, 27) = 8.95$ , for experiments 1 and 2, respectively. As we will show below, the lag on the sagittal component of the task took place while most of the correction for the cursor jump occurred on the frontal dimension of the task, whereas the final adjustments on the sagittal dimension of the task occurred when correction on the frontal dimension of the task were largely completed.

#### Correction for the imposed perturbation on the direction component of the task

The results reported for the proportion of trials showing a discrete correction indicates that, when the correction needed to compensate the effect of the perturbation required going further in the initial direction of the movement (i.e., perturbation to the right when aiming to a target located to the left of one's midline), almost no discrete corrections were noted. In contrast, when the compensation for the perturbation required a reversal in initial movement direction (perturbation to the left when aiming to a target located to the left of one's midline), a high proportion of the trials showed a discrete correction. To evaluate the time course of the adaptation for the imposed perturbation in each one of these two situations, we determined where and when peak frontal acceleration, velocity, deceleration, the end of the primary impulse and movement endpoint occurred for the control and cursor jump trials. For these analyses, we only considered movements executed towards the four corner targets. In addition, these analyses are based on the trials pertaining to the most frequent category as a function of target location. Thus, for the control trials, we only considered trials not showing a discrete correction. This was also the case for cursor jump trials directed towards right targets in experiment 1 and left targets in experiment 2. Cursor jump trials showing a

discrete correction were used in these analyses for movements directed towards left targets in experiment 1 and left targets in experiment 2.

The results of interest are illustrated in Figure 3. In both experiments 1 and 2, regardless of the type of trials, there were no differences in the position reached by the cursor when peak frontal acceleration was reached. However, significant differences in the location of occurrence of the remaining kinematic markers were observed between cursor jump and control trials.

For the cursor jump trials that did not show evidence of discrete correction, as soon as peak frontal velocity was reached, the position of the cursor was displaced significantly by 16.3 mm to the right (experiment 1) and 12.4 mm to the left (experiment 2) in comparison to the control trials. When peak frontal deceleration was reached, these corrections significantly increased to 20.2 mm and 22.3 mm, respectively. No further significant increase in these corrections were noted between the occurrence of peak frontal deceleration and movement endpoint.

For the trials that showed a discrete correction to compensate for the cursor jump, when peak frontal velocity was reached, the position of the cursor was displaced significantly by approximately 3.8 mm to the right (experiment 1) and 11.2 mm to the left (experiment 2) in comparison to the control trials. These corrections significantly increased to 8.8 mm and 18.7 mm, by the occurrence of peak frontal deceleration and to 12.6 mm and 20.2 mm by the end of the primary impulse, respectively. The discrete correction that followed the end of the movement's primary impulse further increased these corrections to 21.2 mm and 26.2 mm in experiments 1 and 2, respectively. These

effects are supported by significant Type of trials x Direction x Kinematic Landmarks interaction,  $F(4, 32) = 137.1$ ,  $F(4, 36) = 19.5$ , respectively.

As illustrated in Figure 4A, the corrections that took place to compensate for the cursor jump did not have a temporal cost. For the trials that did not show a discrete correction, peak frontal velocity, deceleration and movement endpoint occurred respectively 93 ms, 79 ms, and 37 ms later for the cursor jump than for the control trials in experiment 1, but 95 ms, 141 ms, and 37 ms earlier than the control trials in experiment 2. Because cursor jump trials resulted in longer or shorter movements than control trials in experiment 1 or experiment 2, respectively (i.e., equivalent to the size of the cursor jump), we normalized the moment of occurrence of these kinematic landmarks to take into account the displacement of the cursor when each one of these landmarks occurred (time/vector's length). Figure 4B shows no difference in normalized movement time for the cursor jump and control trials. No significant main effect of the type of trials or of any interaction involving this factor were noted,  $p > .15$ .

For the trials that showed a discrete correction, peak frontal velocity, deceleration and movement endpoint occurred respectively 25 ms, 61 ms, and 310 ms earlier for the cursor jump than for the control trials in experiment 1, and also 90 ms, 110 ms, and 280 ms earlier than the control trials in experiment 2. Thus, the correction for the cursor jump had already been initiated during the movement's primary impulse at no temporal cost. The discrete correction that followed the movement's primary impulse was completed between 283 ms and 352 ms as a function of target location in both experiments 1 and 2. As illustrated in Figure 4B, this discrete correction did not significantly increase the time

required to complete the task once movement time has been normalized for movement length ( $p > .15$ ).

Correction for the cursor jump does not interfere with online processes reducing noise in initial movement planning

The results presented so far indicate that participants were able to amend their movement at no temporal cost to correct for the cursor jump, regardless of whether or not they had to resort to a discrete correction to achieve endpoint accuracy. Because these corrections were already evident at the occurrence of peak direction velocity of the movement's primary impulse, this suggests that, at least for relatively slow movements, the early portion of the movement is under visual control. Our next step was to determine whether the correction processes required to compensate for the cursor jump interfered with those usually required to compensate for noise in the movement planning processes (Bédard & Proteau, 2004; Khan et al., 2002, 2004; Lhuisset & Proteau, 2004; Proteau, 2004; Robin et al., in press). If the processes responsible for the correction observed for the perturbed trials interfered with the online processes reducing noise in movement planning, we should observe different rates of reduction of initial movement variability as movement progresses towards the targets between the cursor jump and the control trials. To test this possibility, we computed from the kinematic profiles obtained on the direction dimension of the task where peak acceleration, peak velocity, peak deceleration, end of the movement's primary impulse and movement endpoint occurred in Cartesian space. Then, we determined the within-participant variability of direction and extent for each of these key kinematic landmarks and computed coefficients of direction and of extent variability (CDV and CEV, respectively; variability/length of the

movement vector at each kinematic landmark) to normalize variability for movement extent.

Results of CDV and CEV are illustrated in Figure 5. Three major conclusions can be drawn from these figures. First, as in previous work (Bédard & Proteau, 2004; Lhuisset & Proteau, 2004; Proteau, 2004) there is a sharp and significant decrease in both CDV and CEV between the occurrence of peak frontal acceleration and peak frontal velocity in both experiments, regardless of target location. The large coefficients of direction and of extent variability observed at the occurrence of peak extent acceleration and their subsequent quick decrease suggest that initial movement planning takes place over a very noisy background, and that this noise is quickly reduced as movement unfolds. We will come back to this point later on in the discussion. Second, both CDV and CEV are significantly larger at the occurrence of peak extent acceleration when aiming towards targets located to the left of one's midline than when aiming towards target located to the right of one's midline. This is supported by significant Direction x Kinematic landmark interactions (experiment 1:  $F(4, 32) = 162.5$  and  $170.7$ , for CDV and CEV, respectively; experiment 2:  $F(4, 36) = 12.5$  and  $12.1$ , respectively). Because movement variability is linearly related to the amount of force required to produce a movement (Schmidt et al., 1979; Meyer et al., 1982), this increased variability can result from larger limb initial inertia when aiming to the left rather than to the right of one's midline (Gordon et al., 1994). Conversely, it could result from inconsistencies in defining the appropriate movement vector or transforming it into motor commands when aiming to the left rather than to the right of one's midline.

---

Insert Figure 5 approximately here

---

Third, but foremost in the framework of the present study, regardless of target location or kinematic landmarks, cursor jump and control trials never differed significantly from one another (no significant main effect of the type of trials nor any significant interaction involving this factor,  $p > .10$ , for both CDV and CEV in experiments 1 and 2). These results strongly suggest that the correction processes put into play to correct for the imposed perturbation did not interfere with the processes compensating for normal noise in planning processes.

## Results: Experiment 3

Cursor jump trials completed in normal vision did not differ from those completed in no-vision

In experiment 3, once the cursor jump had occurred it either remained visible (cursor jump-V condition) until movement endpoint or was masked shortly after it had jumped (cursor jump-NV condition). In the cursor jump-NV condition, the displaced cursor trajectory remained visible for 39.8 mm (s.d.: 0.9 mm), or for 57 ms (s.d.: 0.86 mm) or 85 ms (s.d.: 0.84 mm) for closer or farther targets, respectively.

Although no participants reported having detected the cursor jump, participants corrected their movements for the cursor-jump for both the cursor jump-V or -NV conditions. Specifically, for the control trials, participants ended their movements very close to the target, regardless of its location. As in experiment 2, for the cursor-jump trials, they ended their movements significantly more to the left of all targets in comparison to the control trials (see Figures 6A-end and 8A-end), while also producing significantly shorter movements for the cursor-jump than for the control trials (see Table 2). The direction correction was significantly larger when aiming to targets located to the right of one's midline (15.5 mm and 21.8 mm, for the left and right targets, respectively) whereas the extent correction was of 7.5 mm and 7.9 mm for the left and right targets, respectively. The former effect is supported by significant Type of trials x Direction interaction,  $F(2, 16) = 14.6$ , whereas the latter effect is supported by a significant Type of trials main effect,  $F(2, 16) = 13.1$ . However, the point of major importance in this experiment is the observation that the correction for the cursor jump did not differ significantly between trials completed with or without vision of the cursor

(correction was 4 mm larger for cursor jump trials completed in normal vision than in no-vision to the left targets but 3 mm smaller when aiming to right targets).

Because movement endpoint variability did not differ much as a function of the types of trial, it appears that participants modified the trajectory of their movements for a very large proportion of the cursor jump trials. Nonetheless, endpoint direction and extent variability were significantly larger for the cursor jump NV-trials (6.9 mm and 10.1 mm, respectively) than for either the cursor jump-V or control trials which did not differ significantly from each other (direction: 6.3 mm, and 5.0 mm; extent 7.2 mm and 6.4 mm, for control and cursor jump-V trials, respectively),  $F(2, 16) = 9.6$  and  $19.77$ , respectively.

---

Insert Figures 6, 7, and 8 approximately here

---

Correction for the cursor-jump perturbation did not occur at the expense of longer movement duration. Perturbed trials whether they were completed in normal vision or in no vision did not result in significantly longer movement times than control trials (see Figures 7 and 8B-C). This was true for all four target locations; for the lower right target, control trials even had significantly longer movement times than cursor jump-V or cursor jump-NV trials (967 ms, 930 ms, and 929 ms, respectively). This is supported by a significant Direction x Distance x Type of trials interaction,  $F(2, 16) = 4.57$ .

Correction for the cursor jump: modulation of the movement's primary impulse and/or discrete correction



As in experiments 1 and 2, there were less than 5% of the trials showing a discrete correction on the sagittal component of the task (see method for details). The significant target undershoot of the cursor jump-V and -NV trials in comparison to the control trials that has been presented previously was already in place at the occurrence of peak extent deceleration (not significant for targets located to the right of one's midline; see Table 2) and movement endpoint. This is supported by a significant Type of trials x Direction x Kinematic landmarks interaction,  $F(6, 48) = 12.96$ .

---

Insert Table 2 approximately here

---

On the frontal component of the task, the proportion of trials showing a discrete correction did not significantly differ between cursor jump-V and -NV trials; these corrections were significantly more frequent for cursor-jump than for control trials for the closer left and farther right target, only (see Table 3). Because the proportion of trials showing a discrete correction approached 50% for 5 of the 12 types of trials x target combinations, we analyzed the time course of the correction for the cursor-jump trials separately for trials showing or not showing a discrete correction. In all cases, we determined where and when peak frontal acceleration, velocity, deceleration, and the end of the primary impulse occurred for the control and cursor jump trials. For trials showing a discrete correction we also determined when and where movement endpoint occurred.

---

Insert Table 3 approximately here

---

Trials not showing a discrete correction: no differences between cursor jump-V and -NV trials

The results of interest are illustrated in Figure 6A. As early as the occurrence of peak frontal velocity, the location reached by the cursor was already significantly more to the left for the cursor jump-V (6 mm) and NV (7 mm) trials in comparison to the control trials. This “bias” did not differ significantly between cursor jump-V and -NV trials and was opposite to the direction of the cursor jump. The bias grew significantly larger as movement unfolded and reached 18.5 mm at the occurrence of peak extent deceleration without any further significant modification between the occurrence of peak frontal deceleration and movement endpoint. Thus, by movement endpoint, participants had corrected for 66% of the imposed cursor jump regardless of whether or not vision of the cursor was permitted for the second half of the movement. This is supported by a significant Type of trials x Kinematic landmark interaction,  $F(6, 48) = 42.19$ .

Modulating one’s movement to compensate for noise inherent to the movement planning processes and for the added error resulting from the cursor jump did not interfere with one another even for the cursor-jump-NV trials. The coefficients of extent and of direction variability illustrated in Figures 6B and 6C show a large and equivalent decrease in CDV and CEV between the occurrence of peak acceleration and peak velocity for both the control and cursor jump-V and NV trials followed by a much smaller decrease in these coefficients as movement unfolded. The only significant differences that were observed indicate that both CDV and CEV were significantly larger at the occurrence of peak acceleration when aiming to the left than to the right of one’s

midline. This is supported by significant Direction x Kinematic landmark interaction,  $F(3, 9) = 9.71$  and  $9.75$ , respectively.<sup>1</sup>

Finally, as illustrated in Figure 7A, the time course of the correction for the cursor jump did not differ depending on whether or not one could see the cursor until movement completion. For both the cursor jump-V and -NV trials, peak frontal velocity and deceleration occurred significantly later than for the control trials when aiming to the left of one's midline, whereas the reverse was true when aiming to the right of one's midline. These differences as a function of movement direction and type of trials did not remain significant at movement endpoint. This is supported by a significant Direction x Type of trials x Kinematic landmark interaction,  $F(6, 48) = 22.39$ . All differences between cursor jump and control trials disappeared once movement time had been normalized for movement length (Figure 7B). In fact, the normalized movement time data only revealed that participants moved the cursor more slowly until it reached peak frontal velocity when aiming to the left rather than to the right of one's midline,  $F(3, 24) = 64.9$ .

Trials showing a discrete correction: correction for the cursor jump is functional

Although there was an overall fair proportion of trials showing a discrete correction for the cursor jump trials, many participants did not show enough of these rendering it impossible to compute statistical analyses. Thus, we averaged the position and the time of occurrence of key kinematic landmarks for the perturbed trials showing a discrete correction and the control trials not showing such a correction (there were too

---

<sup>1</sup> Note that data from 3 participants were excluded from these analyses because of an insufficient proportion of trials not showing a discrete correction in one cell of the experimental design.

few control trials showing a discrete correction to be reliable). These data are illustrated in Figure 8.

From this figure, it is apparent that the cursor jump trials showing a discrete correction did not differ much both on their spatial (Figure 8A) and temporal (Figures 8B-C) characteristics as a function of whether or not the cursor was visible for the latter portion of the movement. In fact, it is apparent that, regardless of the position of the target, these trials were initiated closer to the participants' midline than the control trials. This poor initial planning had a positive effect on the perturbed trials when participants aimed to targets located to the right of their midline but an adverse effect when they aimed towards targets located to the left of their midline. In the former case, it resulted in participants not having much to do to correct for the cursor jump and, indeed, only a very small correction was noted. In the latter case, participants had a large correction to make because the effects of poor initial planning added to those of the cursor jump.

Two important observations emerged from these trials. First, the correction that takes place to eliminate the effect of the cursor jump is functional. That is, participants do not try to compensate for the full perturbation when there is no need to. For instance, when aiming to targets to the right of their midline, we noted a correction of only 3 mm. Second, regardless of the size of the perturbation, movement time, and especially normalized movement time, remained largely unchanged in comparison to movement time observed for the control trials. This indicates that participants were able to pick up sufficient information during the primary impulse of their movement to complete it and to plan in parallel the required discrete correction, at no temporal cost.

## Discussion

Our goals in the present study were to determine whether, and eventually how, one can amend the primary movement impulse of his or her movement to compensate for a relatively large movement planning error. To reach that goal, we experimentally induced a large error by translating the position of the cursor moved by the participants soon after they had initiated their movement. Because the cursor jump was not detected by the participants, this perturbation was likely considered as a planning error by the CNS. Although the participants did not perceive this cursor jump, they all quickly corrected their movement to compensate for it. This correction did not permit participants to be as accurate as for control trials, however.

#### Online correction of the ongoing movement

The endpoint results of the present study are well in line with those published in a series of recent studies. However, they add to those previous results in numerous important ways. First, as was the case with Sarlegna et al.'s (2003, 2004) and Saunders and Knill's (2003, 2004) studies, our results show that one can correct his or her movement in a cursor-jump paradigm much as has been shown in a target-jump or double-step studies (Prablanc and Martin, 1992; Goodale et al., 1986; Desmurget et al., 1999). This demonstration is important because in target-jump studies it was never clear whether the movement adaptation for the target displacement occurred at the movement planning or at the movement control level. For instance, in target-jump studies, the location of the target is typically modified as the participants initiate their saccade towards it. Considering that the saccade rarely, if ever, ends directly on the target, a corrective saccade is required. Because hand movement initiation generally follows the initiation of this corrective saccade, it is not clear whether the final stage of the hand

movement planning processes only takes place after the final position of the eye has been determined. If so, the corrections/adjustments found in target-jump studies to compensate for the translation in the location of the target reflects quick modifications in movement planning processes, not quick and efficient online control processes.

Second, our results add to those of Sarlegna et al's. (2003, 2004) by showing that the movement correction compensating for the cursor jump takes place even when that cursor jump is totally unpredictable. In Sarlegna et al. (2003, 2004), the position of the cursor moved by the participant was translated from its original position on every single trial. The size and direction of this cursor jump was modified from one trial to the next, however. Because participants did not perceive the cursor jump, when they visually detected the cursor, its position varied tremendously from one trial to the next. Thus, participants faced a very noisy system, which could have encouraged them to rely heavily on visual afferent information to control their movements than in a more natural situation. Our results show that the corrections for the cursor jump occurred even when a very low proportion of the trials is perturbed. This suggests that visual online control remains active even in expert systems for which large planning errors are random rather than the rule.

In Saunders and Knill (2003, 2004), participants moved a cursor from a start position towards one of many targets. The trajectory of the cursor was masked for 4-5 cm soon after movement initiation. The cursor jump occurred while the cursor went through this masked portion of its trajectory. Although translating the position of the cursor while it was not visible decreased the possibility that it be detected, masking the trajectory might have encouraged the participants to pay more attention to "where" the

cursor emerged from the masked area. Therefore, this procedure might have biased the participants' behavior towards paying more attention than is usually the case to visual afferent information of the hand. Our procedures eliminated this possibility and still we found large corrections for the cursor jump.

#### Time course of the correction for the cursor jump

One of the major contributions of the present study concerns the detailed analysis of the time course of the correction elicited by the cursor jump. These corrections took place for a very large proportion of the cursor jump trials ( $\geq 95\%$ ) and, regardless of whether or not they included a discrete correction, we showed that the correction was initiated during the movement's primary impulse. This aspect of the results supports and extends previous observations reported in a series of recent studies (Bédard & Proteau, 2004; Lhuisset & Proteau, 2004; Messier & Kalaska, 1999; Proteau, 2004; see also Khan et al., 2002, 2004).

For example, Proteau (2004) had participants perform a task very similar to that used in the present study and noted a decrease in both CDV and CEV as movements progressed towards the targets. It is thought that this reduction in CEV and CDV reflected the ability of the CNS to reduce movement variability resulting from noise in the movement planning processes. The results of the present study add to this previous finding by indicating that this modulation of the movement's primary impulse also occurs to reduce a large and unpredictable movement error, and that these two processes, at the very least, do not interfere with one another. We will come back to this point.

The cursor jump took place between 320 ms (experiment 3) and 360 ms (experiments 1 and 3) after movement initiation. By contrasting the position of the

cursor for control and cursor jump trials at the occurrence of key kinematic landmarks computed on both the frontal and the sagittal components of the reaching movement, we were able to determine the earliest kinematic landmark for which the cursor jump trials showed a significant modification of their trajectory in comparison to the control trials. The results of these analyses showed that by the time the cursor had reached peak frontal velocity of the movement's primary impulse, a significant deviation of the cursor trajectory opposite to the direction of the perturbation had taken place. Depending on the target location, this estimate of a correction latency varied between 35 ms and 85 ms. This very short latency, and the observation that a correction was observed for almost all trials supports various recent propositions of continuous processing of the visual afferent information (Elliott, Binsted, & Heath, 1999; Proteau & Isabelle 2002; Saunders & Knill, 2003). However, continuous processing of visual afferent information should not be considered equivalent to continuous online control of one's movements (Saunders & Knill, 2003).

Specifically, Saunders' and Knill's (2003) proposition that visual afferent information is "incorporated into continuous on-line control throughout reaching movements" (p. 349) is hard to reconcile with three aspects of the present data. First, if visual afferent information ensures continuous control, it is surprising that we did not observe a complete correction for the cursor jump. This was the case, both in the present study as well as in earlier work for which the correction compensated for between 45% and 80% of the cursor jump. (Saunders & Knill, 2003: 60%; 2004: 80%; Sarlegna et al., 2003, 2004: 45%). One could argue that this only indicates that participants had not the time to complete the correction before movement was considered completed. However,



this possibility is at odds with our observation that, for the trials that did not show a discrete correction in the present study, no increase in the correction was observed between peak frontal deceleration and movement endpoint. Second, in experiment 3, we observed no difference in the time course of the correction for the cursor jump-V and-NV trials. If visual afferent information had permitted continuous online control, we should have observed a larger correction for the former than for the latter condition. Conversely, this latter observation might indicate that continuous control of one's movement could flip-flop seamlessly between the visual afferent input that permitted participants to initiate the correction and proprioceptive afferent input that remained available for the second half of the movement. Third, in all three experiments of the present study, we observed that the correction needed to compensate for the cursor jump in the sagittal axis was somewhat delayed in comparison to the correction on the frontal axis. Specifically, most of the corrections on the sagittal axis took place between peak frontal deceleration and movement endpoint, whereas large corrections had already occurred or were even completed (for trials not showing a discrete correction) on the frontal axis at the occurrence of peak frontal deceleration. If visual afferent information ensures continuous online control, one would have expected a continuous correction on both axes. One could argue that the correction on the sagittal axis occurred later in the movement than that on the frontal axis because it was more efficient to perform this correction when the cursor was closer to the target (for example, see Paillard, 1980; Paillard & Amblard, 1985), or that correction for direction and extent errors involve different mechanisms (Messier & Kalaska, 1999). We checked this possibility in a different series of experiments in which the cursor jump occurred at the same location as in the present study but moved the

cursor by 30 mm on a line joining the starting base and the target. Thus, most of the perturbation occurred on the sagittal axis. We observed significant differences between cursor jump and control trials as soon as at the occurrence of peak velocity, which questions the last argument. These last observations, in contradiction with Paillard's model (1980; Paillard & Amblard, 1985), also support recent findings indicating that the peripheral retina is apt at picking up information used to correct the direction but also the extent dimension of one's movement (Bédard & Proteau, 2003; 2004; Saunders & Knill, 2004).

From the results of the present study and that of previous work, it appears unlikely that the correction for the cursor jump results from visual input permitting continuous online control. Nonetheless, in both Saunders and Knill (2003, 2004) and in the present study, the location or type of perturbation applied to the cursor was modified from one experiment to the next (Saunders & Knill, 2003, 2004) or even from trial to trial (present study) and still the same pattern of correction was observed. In addition, the results of experiment 3 (see also Körding and Wolpert, 2004) indicate that the error can be detected and a correction be planned in less than 50 ms (cursor jump-NV condition). Because, an error in movement trajectory can be detected and processed quickly at different locations in the movement trajectory, it appears that the cursor displacement is processed continuously by the CNS but that aiming errors (i.e., incomplete correction for the cursor jump) still occur because of either a time lag in the complete implementation of the correction – which would break the continuous aspect of the system- and/or a limitation to the size of the correction that can be achieved via this continuous or pseudo-continuous system.

There is little doubt that there is a time lag between the moment an error is detected in the direction of one's movement and the initiation of a correction. In the present study, this time lag was very short (35 ms-85 ms) and in itself cannot explain, for example, why participants did not fully compensate for the cursor jump considering that no correction occurred between peak frontal deceleration and movement endpoint for the cursor jump trials that did not show a discrete correction (for example, the time delay between the occurrence of these two kinematic landmarks for the cursor jump-V trials in experiment 3 oscillated between a low of 238 ms and a high of 303 ms as a function of target location). Rather, it appears that there is a limit to the size of the correction that can be achieved through this "pseudo-continuous" system. Once this limit has been exceeded, the CNS can no longer simply modulate the movement to adapt it to the current condition. Rather, a new movement must be planned, which is both time and resources demanding. Asking participants to complete their movement in a single motion (present study), considering it completed when the hand was still traveling at a relatively high velocity (10 cm/s, Knill & Saunders, 2003), or asking participants to produce very fast movements (Bédard & Proteau, 2003; Sarlegna et al., 2003, 2004) probably prevented them from resorting to these slower correction processes, which explains why they were not as accurate for cursor jump trials as for control trials.

The hypothesized limit of this "pseudo-continuous" processing of visual afferent information could be exceeded when the error detected falls outside the normal variability of one's movement, which given the size of the cursor jump that had been used, could have been the case in both the present study and those of Saunders and Knill (2003, 2004). The fact that we did not find any trace of a difference between the cursor

jump-V and -NV trials in experiment 3, supports this proposition. An error was quickly detected by visual afferent information which triggered corrective processes that could not be further refined regardless of whether or not visual afferent information remained available. Conversely, as already suggested by Sarlegna et al. (2004), it could have been that the correction is incomplete because of a conflict between the seen position of the cursor and the felt position of the hand which were decorrelated by the cursor jump. This latter proposition of Sarlegna et al. (2004) is not supported, however, by the very similar results obtained in experiment 3 for the cursor jump-V and -NV trials. If the incomplete correction observed for the cursor jump had resulted from a conflict between visual and proprioceptive afferent information, because this conflict no longer existed in the cursor jump-NV condition for at least the second half of the movement, we should have observe a much smaller correction for the latter condition than for the cursor jump-V condition.

Online correction for large planning errors and noise inherent to movement planning are based on the same processes

Our observation that there was an absolutely identical decrease in the coefficients of direction and of extent variability for the cursor jump and the control trials and that the corrections for the cursor jump occurred at no temporal cost suggest that the processes put into play to reduce noise in initial movement planning and correcting for the cursor jump at least during the movement primary impulse might be one and the same. The large coefficients of variability observed early after movement initiation can result from a series of uncertain factors including the initial location of the hand, the location of the target in the workspace, the state of the motor system (motor pathways, motoneurons pool, motor units, etc.) as well as from a variety of mechanical constraints. Because of

these uncertainties, the CNS has developed mechanisms to quickly update the motor commands after movement initiation. This updating occurs even when dynamic visual afferent is not available (i.e., cursor is not visible; Bédard & Proteau, 2004; Lhuisset & Proteau, 2004; Messier & Kalaska, 1999) suggesting an important contribution from proprioceptive feedback and/or feedforward processes. Nonetheless, because this reduction in CDV and CEV is more important when dynamic visual afferent information is also available, it suggests that the CNS uses various sources of information to define with exactitude the state of this system, which reduces considerably movement variability. The results of the present study as well as that of Saunders and Knill (2003, 2004) indicate that there is a limit to the size of the correction/modulation that can be accomplished by this corrective process that requires no conscious effort on the part of the participant. Moreover, because Sarlegna et al. (2004) noted that the correction for the cursor jump in their work accounted for 45% of the perturbation regardless that it was of 1 cm or of 4 cm when fast movements were used and that Bédard and Proteau (2003) noted no correction at all when even faster movements were performed, it appears that this system is time sensitive. Future work should determine the temporal and spatial resolutions of this pseudo-continuous, apparently attention-free online control mechanism.

Finally, the correction that was initiated for the cursor jump trials could have had two objectives, bring the cursor back to its initial trajectory or bring the cursor on the target. For movements initiated directly in line with the target, it is impossible to differentiate between these two possibilities. However, there is one aspect of the results that favors the second possibility. In experiment 3, there were a fair proportion of the

cursor-jump trials that showed a discrete correction. These discrete corrections occurred even if the correction required by the cursor jump were in the same general direction as the participants' initial movement (this occurred very rarely in experiments 1 and 2). We noted that these trials shared a common characteristic: they were initiated closer to the participants' mid-sagittal axis than they should have been. If the correction initiated to compensate for the cursor had had for its sole purpose to bring the cursor back to its initial trajectory, participants should have ended their movements to the left of the left targets and to the right of the right targets. This is not what we observed. Participants calibrated their correction so that their movement would close in on the target (very small correction to the right targets and a much larger one to the left targets), which indicates that the correction was not calibrated to bring the cursor back on its initial trajectory but rather to bring it on the target.

## References

Bédard P, Proteau L (2001) On the role of static and dynamic visual afferent information in goal-directed aiming movements. *Exp Brain Res* 138: 419-431

Bédard P, Proteau L (2003) On the role of peripheral visual afferent information for the control of rapid video-aiming movements. *Acta Psychologica*, 113: 99-117

Bédard P, Proteau L (2004) On-line vs. off-line utilization of peripheral visual afferent information to ensure spatial accuracy of goal-directed movements. *Exp Brain Res* 158: 75-85

Desmurget M, Epstein CM, Turner RS, Prablanc C, Alexander GE, Grafton ST (1999) Role of the posterior parietal cortex in updating reaching movements to a visual target. *Nature Neurosci* 2: 563-567

Elliott D, Binstet, G, Heath M (1999) The control of goal-directed limb movements: Correcting errors in the trajectory. *Hum Mov Sci*, 8: 121-136

Fitts, PM (1954) The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J Exp Psychol* 47:381-391

Goodale MA, Péllisson D, Prablanc C (1986) Large adjustments in visually guided reaching do not depend on vision of the hand or perception of target displacement. *Nature*, 320: 748-750

Gordon ., Ghilardi MF, Cooper SE, Ghez C (1994) Accuracy of planar reaching movements. II. Systematic extent error resulting from inertial anisotropy. *Exp Brain Res* 99:112-130

Khan MA, Lawrence GP, Franks IM, Buckolz E (2004) The utilization of visual feedback from peripheral and central vision in the control of direction. *Exp Brain Res* 158: 241-251

Körding KP, Wolpert DM (2004) Bayesian integration in sensorimotor learning. *Nature* 427: 244-247

Lhuisset L, Proteau L (2002) Developmental aspects of the control of manual aiming movements in aligned and non-aligned visual displays. *Exp Brain Res* 146: 293-306

Lhuisset L, Proteau L (2004) Planning and control of straight-ahead and angled planar movements in adults and young children. *Can J Exp Psychol*, 58 : 244-258

McIntyre J, Stratta F, Lacquaniti F (1997) Viewer-centered frame of reference for pointing to memorized targets in three-dimensional space. *J Neurophysiol* 78: 1601-1618.

Meyer DE, Abrams RA, Kornblum S, Wright CE, Smith JE (1988) Optimality in human motor performance, ideal control of rapid aimed movements. *Psychol Rev* 95: 340-370

Messier J, Kalaska JF (1999) Comparison of variability of initial kinematics and endpoints of reaching movements. *Exp Brain Res* 125: 139-152

Paillard J (1980) The multichanneling of visual cues and the organization of visually guided response. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (pp. 259-279). Amsterdam: North-Holland.



Paillard J, Amblard B (1985) Static versus dynamic visual cues for the processing of spatial relationships. In J. D. Ingle & M. Jeannerod & D. N. Lee (Eds.), *Brain mechanism in spatial vision* (pp. 367-385). La Haye: Martinus Nijhoff.

Prablanc C, Martin O (1992) Automatic control during hand reaching at undetected two-dimensional target displacements. *J Neurophysiol* 67:455-469

Proteau L (2004) Visual afferent information dominates other sources of afferent information during mixed practice of a video-aiming task. *Exp Brain Res*, published online: DOI 10.1007/s00221-004-2090-z

Proteau L, Isabelle G (2002) On the role of visual afferent information for the control of aiming movements towards targets of different sizes. *J Mot Behav* 34: 367-384

Robin C, Toussaint L, Blandin Y, Proteau L (2004) Specificity of learning in a video-aiming task: modifying the salience of dynamic visual cues. *J Motor Beh* (in press)

Sarlegna F, Blouin J, Bresciani J-P, Burdin C, Vercher J-L, Gauthier GM (2003) Target and hand position information on the online control of goal-directed arm movements *Exp Brain Res* 151: 524-535

Sarlegna F, Blouin J, Vercher J-L, Bresciani J-P, Bourdin C, Gauthier GM (2004) Online control of the direction of rapid reaching movements. *Exp Brain Res* 157: 468-471

Saunders JA, Knill DC (2003) Humans use continuous visual feedback from the hand to control fast reaching movements. *Exp Brain Res* 152:341-352

Saunders JA, Knill DC (2004) Visual feedback control of hand movements. *J Neurosci* 24:3223-3234

Schmidt R., Zelaznik H, Hawkins B, Frank JS, Quinn, JT Jr. (1979) Motor-output variability, a theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychol Rev* 47: 415-451

Woodworth RS (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psych Rev* 3  
(Monograph Supplement) : 1-119

Table 1. Mean location of occurrence (standard error) of key kinematic landmarks on the sagittal dimension of the task.

	Left targets		Right targets	
	Cursor jump	Control	Cursor jump	Control
Experiment 1				
Acceleration	10.2 (0.7)	10.2 (0.6)	10.4 (0.3)	9.9 (0.2)
Velocity	117.5 (1.7)	119.4 (1.9)	120.6 (1.5)	118.2 (1.5)
Deceleration	243.8 (2.0)	255.5 (1.3)	248.2 (1.6)	247.3 (1.7)
Endpoint	271.2 (1.7)	267.8 (1.8)	269.5 (1.4)	265.1 (1.0)
Experiment 2				
Acceleration	10.9 (0.4)	10.8 (0.7)	10.9 (0.3)	11.2 (0.4)
Velocity	118.8 (1.1)	121.1 (1.6)	117.3 (1.2)	122.9 (1.5)
Deceleration	235.3 (2.0)	254.0 (3.6)	220.8 (2.0)	249.8 (3.6)
Endpoint	259.0 (1.4)	268.2 (1.7)	257.2 (0.7)	264.0 (1.5)

Table 2. Mean location of occurrence (standard error) of key kinematic landmarks on the sagittal dimension of the task.

	Control trials	Cursor jump-NV	Cursor jump-V
Experiment 3: left targets			
Acceleration	13.8 (0.9)	13.3 (0.5)	14.1 (1.0)
Velocity	115.8 (2.1)	110.4 (2.3)	111.6 (2.0)
Deceleration	234.6 (2.2)	210.2 (3.9)	208.1 (3.3)
Endpoint	261.8 (0.7)	252.2 (2.4)	256.7 (1.5)
Experiment 3: right targets			
Acceleration	14.9 (0.8)	14.4 (0.8)	14.5 (1.0)
Velocity	110.6 (2.3)	108.9 (2.2)	109.9 (1.4)
Deceleration	230.2 (4.7)	228.2 (3.8)	223.8 (3.0)
Endpoint	265.0 (1.3)	256.7 (1.7)	257.3 (0.9)

Table 3. Mean proportions of trials showing a discrete correction (standard error).

Experiment 3.

Target location	Control trials	Cursor jump-NV	Cursor jump-V
Left-closer	18.1 (5.1)	45.8 (10.2)	44.4 (7.8)
Left-farther	40.2 (7.1)	38.8 (6.0)	61.1 (6.4)
Right-closer	16.6 (2.1)	9.7 (4.0)	12.5 (2.9)
Right-farther	5.5 (3.0)	19.4 (5.1)	38 (1.8)

## Figure captions

Figure 1. View of the experimental set-up. Note that the participants used their dominant right hand. Lower left. View of the starting base and of the five targets used in experiments 1 and 2. The central target was not used in experiment 3. Lower right. View of the cursor jump used in the three experiments.

Figure 2. Trajectories of a typical participant for control (darker lines) and cursor jump trials (lighter lines) to farther targets in Experiments 1 and 2. Targets for control trials are illustrated by a dark circle. Lighter circles to the right illustrate the position of the stylus for a complete correction in Experiment 1 whereas lighter circles to the left illustrate position of the stylus for a complete correction in Experiment 2. Control trials are from one participant from Experiment 1. Cursor jump trials to the left are from the same participant. Cursor jump trials to the right are from one participant in Experiment 2. Small “x” indicates location of the cursor jump.

Figure 3. Location of the cursor at key kinematic landmarks of the movement’s primary impulse (acc: peak frontal acceleration; vel: peak frontal velocity; dec: peak frontal deceleration; 1st: end of the movement’s primary impulse) and at the end of the movement (end). Thin horizontal lines illustrate the location of the target for the control trials. Dashed horizontal lines illustrate the position that the cursor should have reached for a complete correction to the cursor jump. Squares represent kinematic landmarks for the two farther targets whereas diamonds represent kinematic landmarks for the two closer targets. Note the large correction for the cursor jump as soon as at the occurrence of peak frontal velocity. Note also that the correction for the cursor jump is not complete even for trials showing a discrete correction.

Figure 4. A. Time of occurrence of key kinematic landmarks (acc: peak frontal acceleration; vel: peak frontal velocity; dec: peak frontal deceleration; 1st: end of the movement's primary impulse; end: movement endpoint) for control and cursor jump trials (CTRL: control trials in experiment 1; Pert-exp. 1: cursor jump to the left; Pert-exp. 2: cursor jump to the right). For sake of clarity, only the results of the farther targets are illustrated. B. Normalized movement time for control and cursor jump trials. Legend as in panel A. Note that the correction for the cursor jump occurred at no temporal cost for both trials showing or not showing a discrete correction at the end of the movement's primary impulse.

Figure 5. Coefficient of direction and of extent variability at key kinematic landmarks for control and cursor jump trials. Legend as in Figure 4. Note the similar reduction in movement planning variability for control and cursor jump trials. Note also the large coefficients of variability at peak frontal acceleration when aiming towards targets located to the left of one's midline.

Figure 6. A. Location of the cursor at key kinematic landmarks of the movement's primary impulse (acc: peak frontal acceleration; vel: peak frontal velocity; dec: peak frontal deceleration; 1st: end of the movement's primary impulse). Thin horizontal lines illustrate the location of the target for the control trials. Note the correction for the cursor jump trials completed in normal vision (Pert-V) or without vision of the cursor (Pert-NV) in comparison to the control trials (CTRL). Note the similarity of Pert-V and Pert-NV trials. B. Coefficient of direction and of extent variability (C) at key kinematic landmarks for control and cursor jump trials. Legend as in panel A. For sake of clarity, only the

results for the farther targets are illustrated. Note the similar reduction in movement planning variability for control and cursor jumps trials.

Figure 7. A. Time of occurrence of key kinematic landmarks of the movement's primary impulse (acc: peak frontal acceleration; vel: peak frontal velocity; dec: peak frontal deceleration; 1st: end of the movement's primary impulse) for control and cursor jump trials (CTRL: control trials; Pert-V: trials completed in normal vision; Pert-NV: trials completed without vision of the cursor). For sake of clarity, only the results for the farther targets are illustrated. B. Normalized movement time for control and cursor jump trials. Legend as in panel A. Note that the correction for the cursor jump occurred at no temporal cost regardless of whether the cursor remained visible until movement endpoint or was masked soon ( $\approx 50$  ms) after the cursor jump.

Figure 8. Location of the cursor at key kinematic landmarks (acc: peak frontal acceleration; vel: peak frontal velocity; dec: peak frontal deceleration; 1st: end of the movement's primary impulse; end: movement endpoint) for cursor jump trials showing a discrete correction. Thin horizontal lines illustrate the location of the target for the control trials. Note the correction for the cursor jump trials completed in normal vision (Pert-V) or without vision of the cursor (Pert-NV) in comparison to the control trials (CTRL-NC: control trials not showing a discrete correction, see main text). Note the similarity of Pert-V and Pert-NV trials. B. Time of occurrence and (C) normalized time of occurrence of key kinematic landmarks for control and cursor jump trials. Legend as in panel A. For sake of clarity, only the results for the farther targets are illustrated. Note that the correction for the cursor jump occurred at no temporal cost.



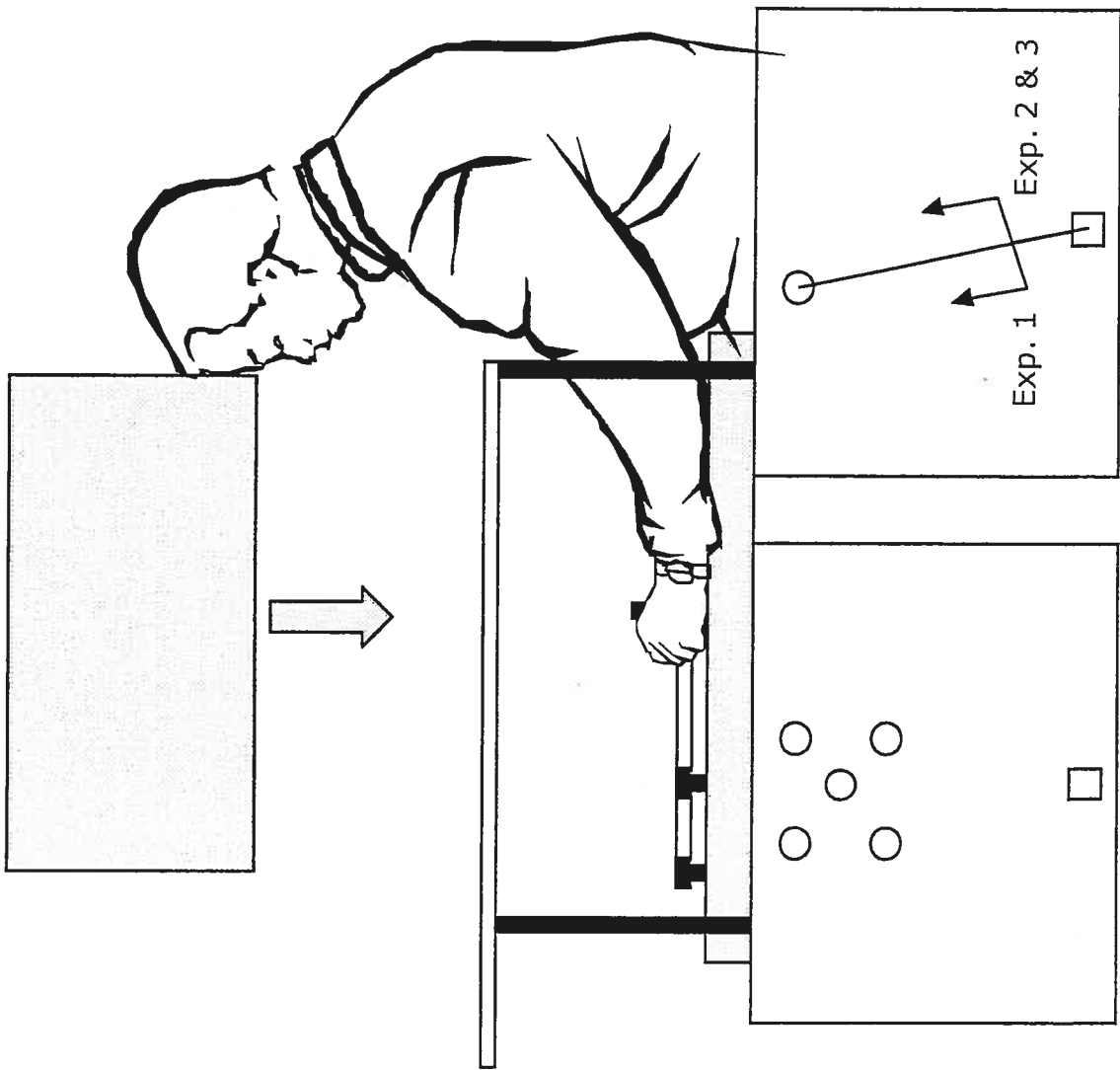
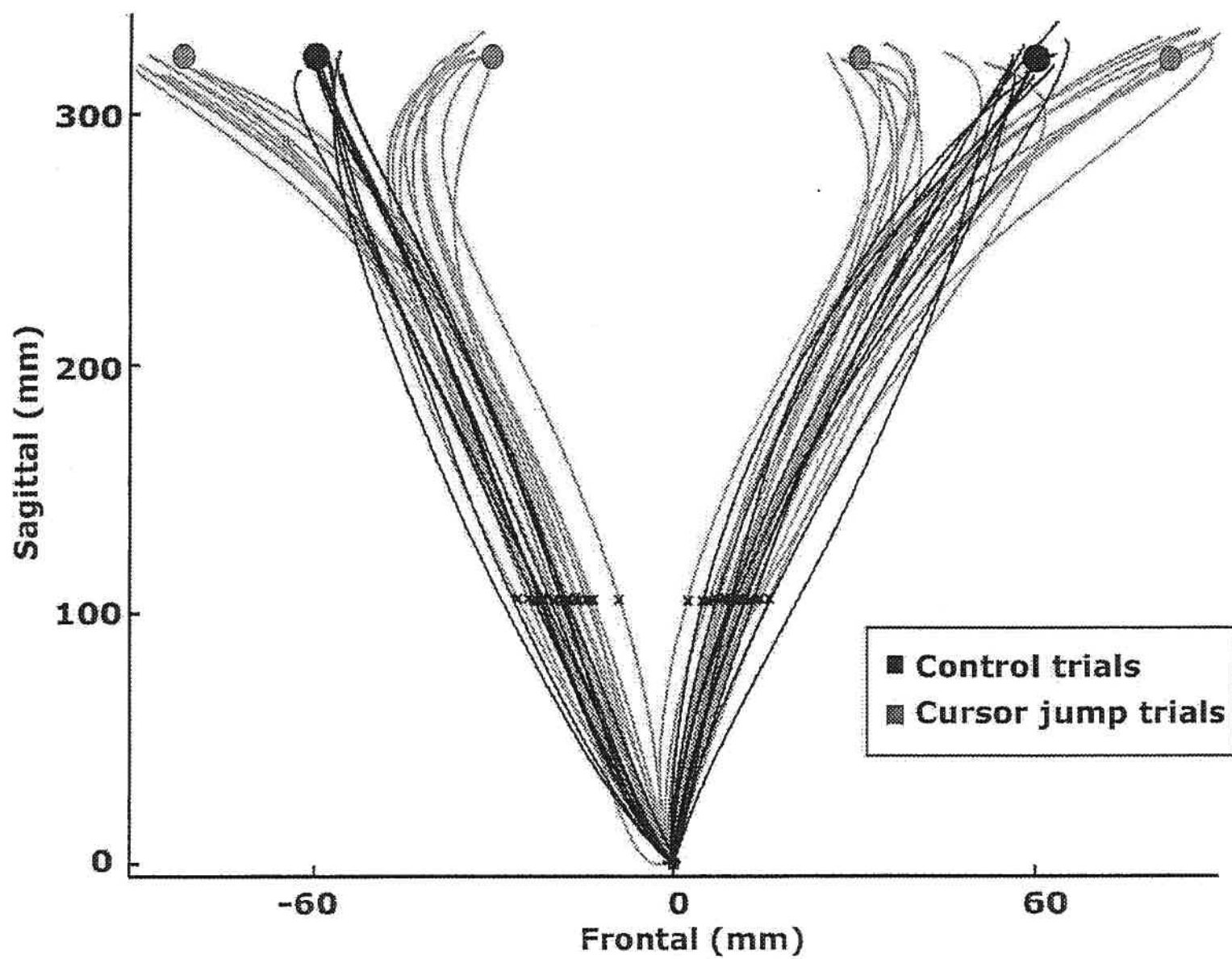


Figure 1



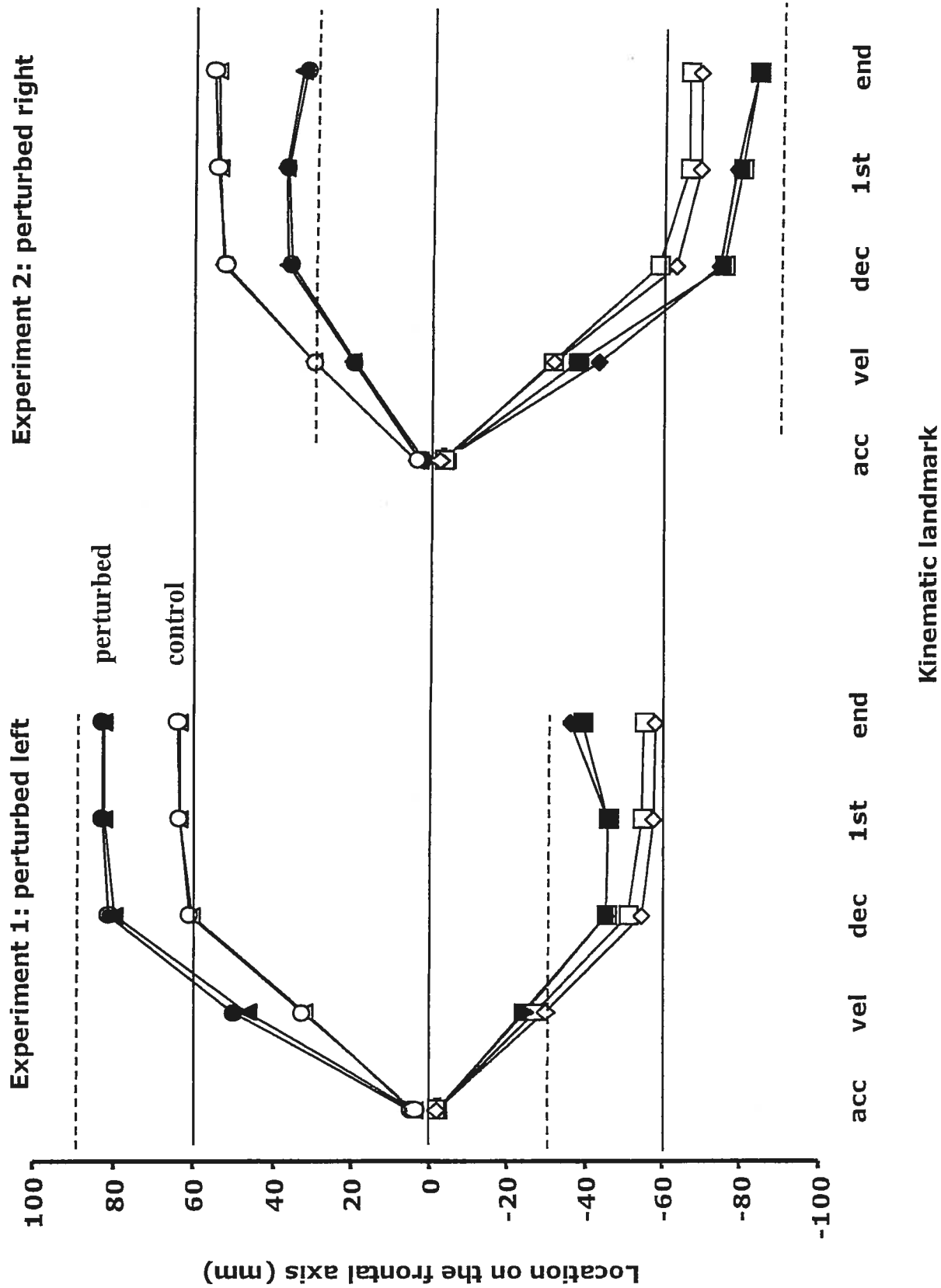
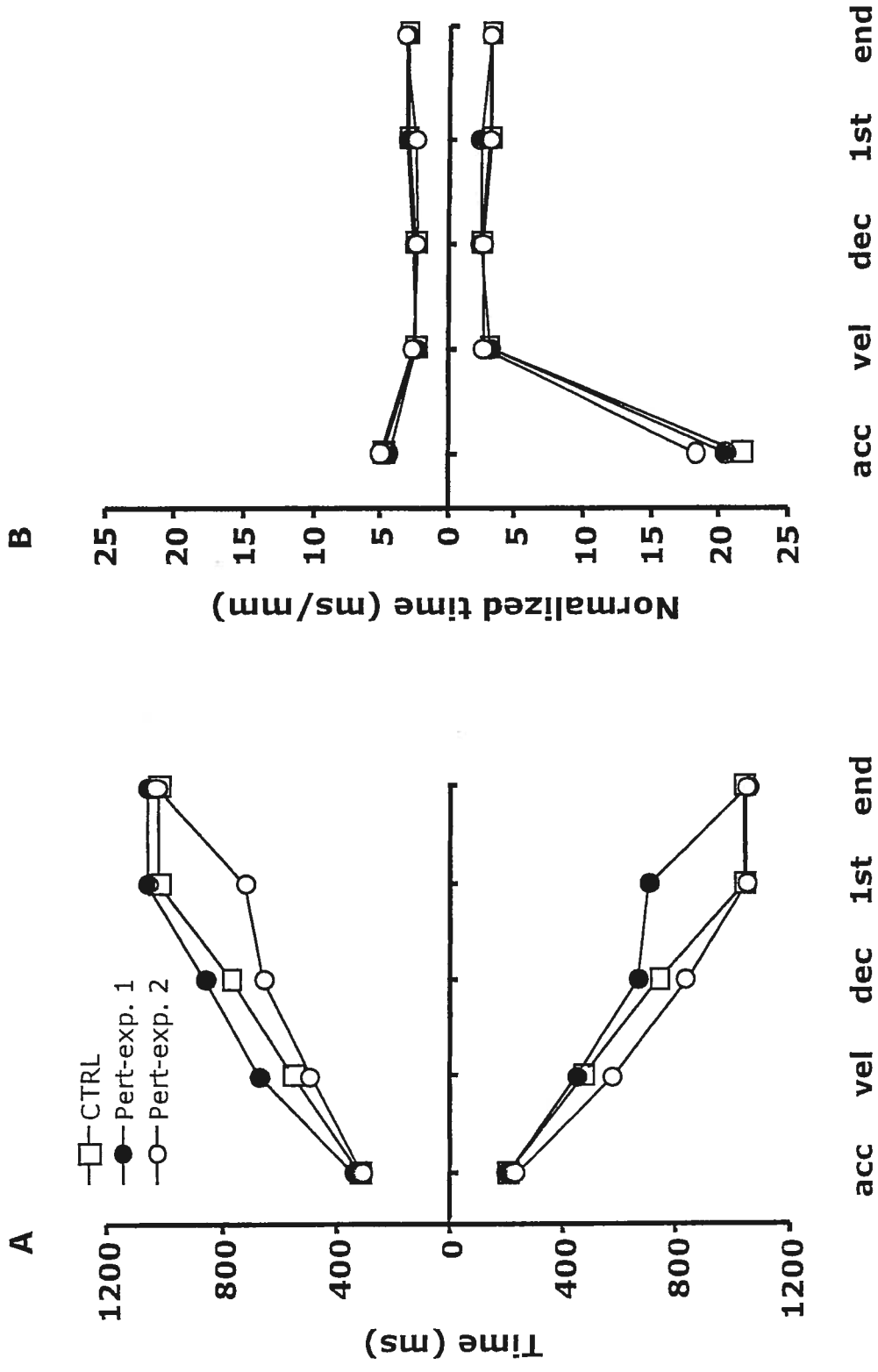
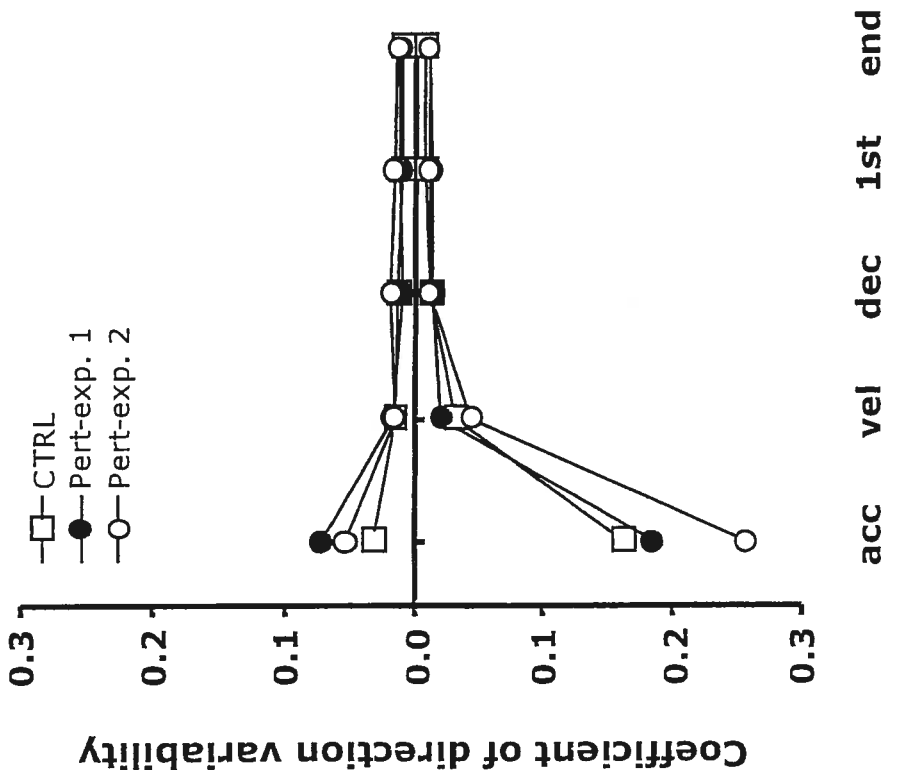
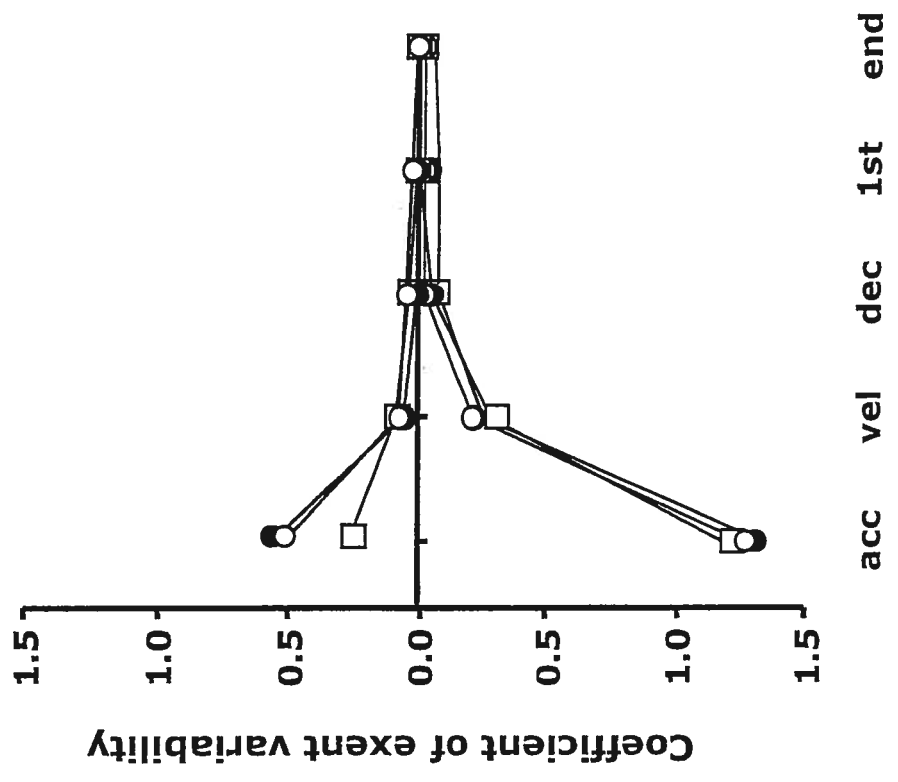


Figure 3



Kinematic landmark



Kinematic landmark

Figure 5

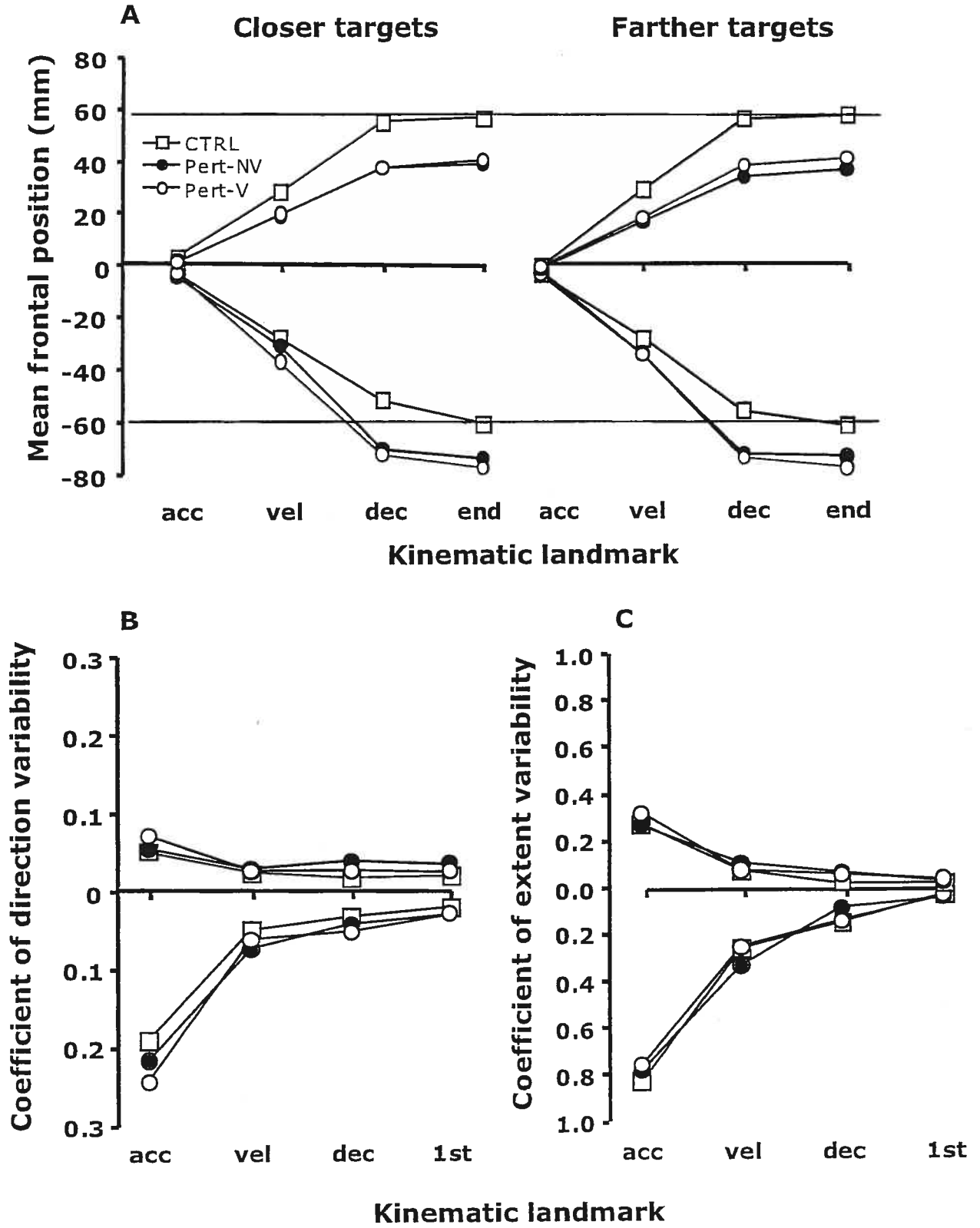


Figure 6

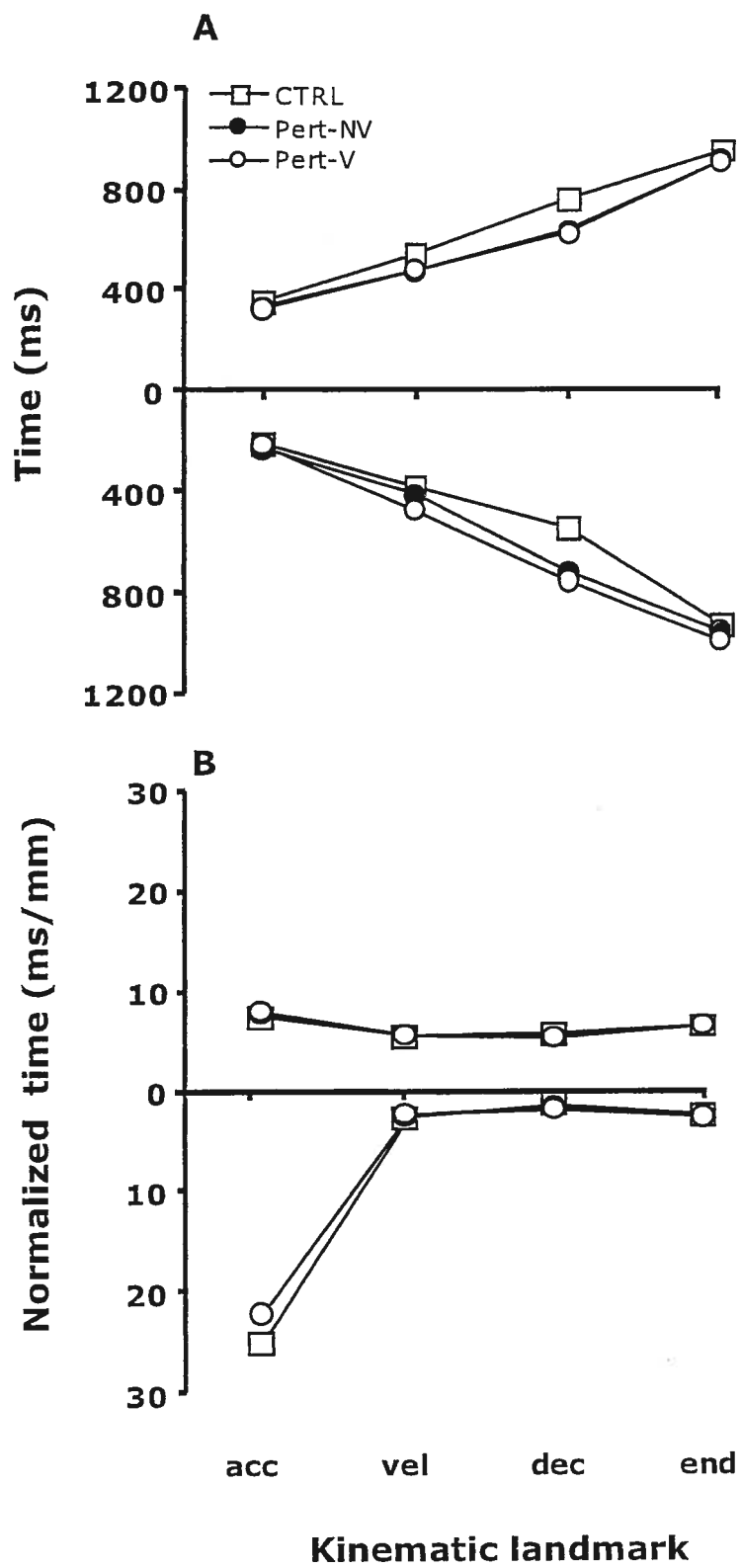


Figure 7

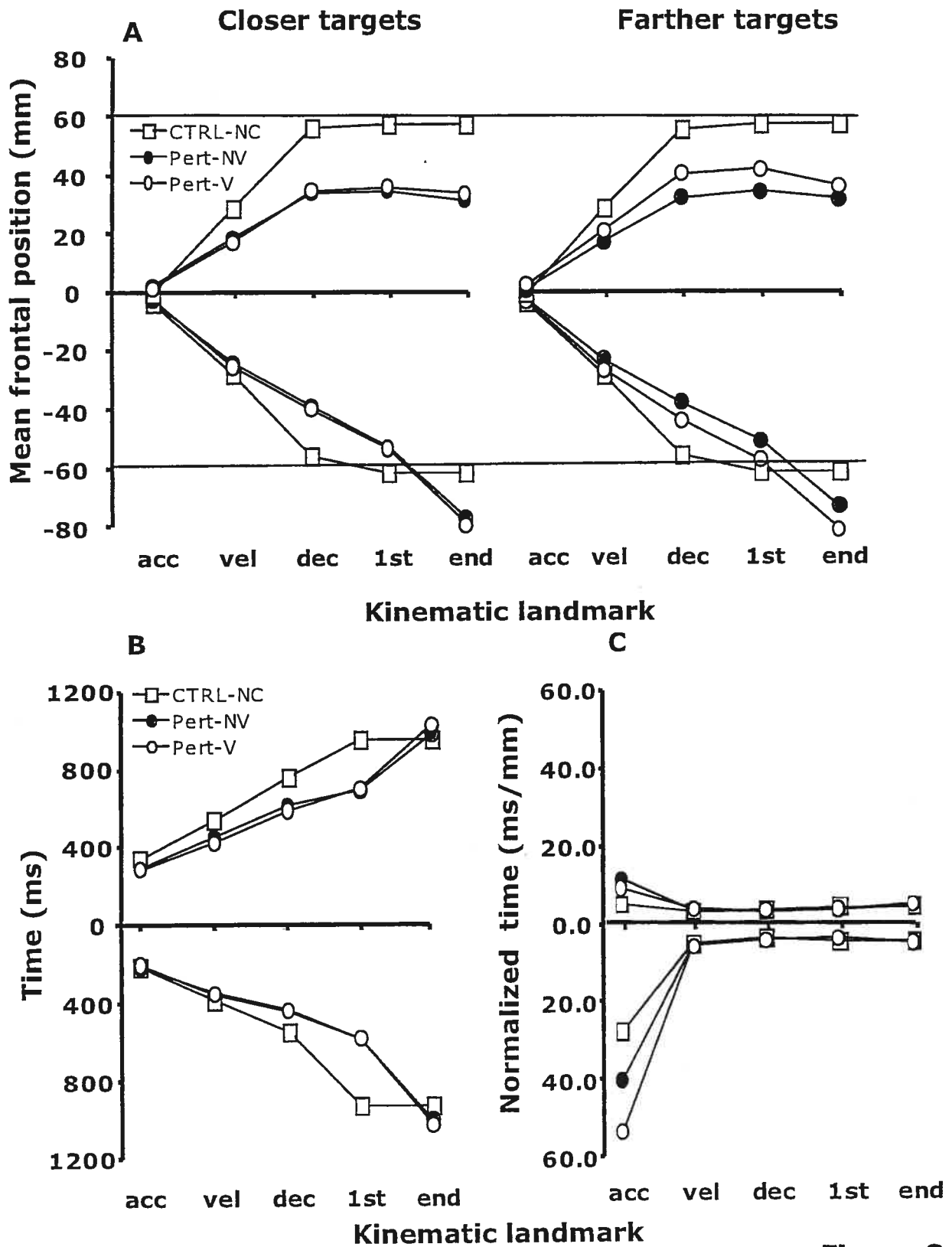


Figure 8



**CHAPITRE 3**  
**DISCUSSION**

## DISCUSSION

Le but de notre étude est de vérifier s'il est possible de modifier la première impulsion d'une atteinte manuelle afin de corriger rapidement et automatiquement pour une grande erreur dans la planification motrice. Pour atteindre notre but, nous avons induit une translation de la position du curseur représentant la main tôt après l'amorce du mouvement. Bien que les participants aient été incapables de percevoir ce 'saut de curseur', ils ont tous corrigé leur mouvement afin de compenser cette perturbation visuelle. Cependant, les participants n'ont pu atteindre un degré de précision spatiale comparable à celui des essais témoins (non perturbés).

Les résultats obtenus dans cette étude confirment et ajoutent aux observations issues d'une série d'études récentes. Tout d'abord, comme ceux de Sarlegna et ses collègues (2003), (2004) et Saunders et Knill (2003,2004), nos résultats démontrent qu'il est possible de corriger un mouvement en cours de réalisation afin de compenser l'effet d'un 'saut de curseur'. Cette correction du mouvement en temps réel est comparable à celle observée dans les conditions expérimentales où la cible change de place ou 'saut de cible' (Prablanc et Martin, 1992; Goodale et al., 1986; Desmurget et al., 1999). Cette démonstration est importante. D'une part, elle suggère que ces mécanismes de correction en temps réel interviennent lorsqu'une erreur motrice doit être corrigée, que cette dernière provienne d'un changement subit de la position de l'objectif à atteindre ('cible') ou d'une perturbation inattendue de la position de l'effecteur mobilisé ('bras'). D'autre part, les résultats des études de saut de curseur permettent de contourner une limite à l'interprétation des observations issues des études de saut de cible. Dans les études de saut de cible, il est fréquemment impossible de déterminer si la correction du

mouvement consécutive au déplacement de la cible dépend des processus de planification motrice ou prioritairement des processus de contrôle du mouvement. Dans ces études, la position de la cible est modifiée durant la saccade oculaire. Comme cette saccade n'atteint que très rarement la cible, une saccade de correction est généralement requise. Étant donné que le déplacement de la main est normalement amorcé à la suite de l'initiation de la saccade correctrice, il est possible que les étapes finales de planification d'une atteinte manuelle prennent place uniquement après que la cible soit fovéalisée. Dans cette perspective, les ajustements du mouvement observés dans les études de saut de cible pourraient refléter prioritairement des adaptations rapides dans les processus de planification motrice, plutôt que l'intervention rapide et efficace de mécanismes de correction en temps réel des mouvements. Dans notre étude, la démonstration que les sujets sont capables de compenser rapidement et efficacement pour un saut de curseur prenant place après l'amorce du mouvement permet d'éliminer cette ambiguïté. Par conséquent, nos résultats fournissent des arguments convaincants en faveur de l'existence de mécanismes de contrôle qui corrigent rapidement les erreurs de mouvement durant leur exécution.

### **Le temps du mouvement**

Tels que présentés en introduction, les résultats de différentes études suggéraient que la qualité, voire la possibilité, de corriger la perturbation induite dépendait du temps alloué aux participants pour réaliser cette correction. À une extrémité, Bédard et Proteau (2003) demandaient aux participants de réaliser leur mouvement en environ 300 ms et n'observaient aucune évidence de correction. À l'autre extrémité, Saunders et Knill

(2003) utilisaient des temps de mouvement de 600 ms et observaient près de 100% d'essais corrigés, dont environ 60% prenait place pendant la première impulsion de mouvement. La qualité de cette correction n'était cependant pas définie. De plus, Kerr et ses collègues (1996) rapportaient qu'à la suite d'une perturbation de la position du curseur lors d'une tâche de poursuite, les sujets sont incapables de corriger pendant la première impulsion du mouvement qui dure 400 ms. Dans leur étude, Kerr et Lockwood (1995) ont constaté que lorsque la position de la cible était déplacée peu après le début du mouvement (presque 50 ms après le début du mouvement du coude), la correction était amorcée avant que la vitesse de la main n'atteigne sa valeur maximale. Notons toutefois que dans leur étude, ils demandaient aux sujets de réaliser le mouvement le plus rapidement et le plus précisément possible. De plus, les sujets ne devaient pas contrôler tous les détails de la trajectoire de la main. Une simple modulation de la force musculaire permettait d'atteindre la cible. Néanmoins, les résultats obtenus par Kerr et Lockwood (1995) corroborent ceux de la présente étude. Nos résultats montrent clairement que les sujets ont amorcé la correction de l'erreur induite avant que la vitesse de la main n'atteigne sa valeur maximale et ce, malgré que le temps de mouvement ait été plus long (autour de 800 ms) et que la tâche utilisée nécessitait le contrôle de la force et de la direction du mouvement afin de réaligner la main sur la cible.

Dans la présente étude, nous avons utilisé un temps moyen de 800 ms et nous avons observé que près de 90% des essais avaient été corrigés à la fin du mouvement et que cette correction compensait environ 80% de la perturbation induite. Comme l'appareil utilisé est identique à celui utilisé par Bédard et Proteau (2003), nos résultats confirment qu'il y a une limite temporelle au-dessous de laquelle les participants ne

peuvent corriger une perturbation semblable à celle que nous avons utilisée. Cette position est confortée par trois aspects des résultats. Premièrement, l'amorce de la correction n'est pas immédiate et requiert un certain temps pour prendre place (nous reviendrons sur ce point plus tard dans la discussion). Deuxièmement, la correction de la perturbation est graduelle et, dans la présente étude, va de la pointe de vélocité jusqu'à la fin du mouvement.

Les résultats de la présente étude ne permettent cependant pas de déterminer si des corrections ne sont pas observées lors de mouvements très rapides uniquement à cause d'un aspect perceptuel (parce que la perturbation n'est pas détectée) ou parce que le participant n'a pas le temps de modifier le mouvement en cours de réalisation.

### **La fréquence de la perturbation**

Les résultats de l'étude de Bédard et Proteau (2003) ne rapportaient aucune correction pour les essais perturbés. Nous avons déjà démontré que cela était partiellement dû au fait que ces auteurs utilisaient un temps de mouvement très court. Toutefois, la fréquence des perturbations utilisées était très faible (17%) tandis que cette fréquence était beaucoup plus élevée dans les études de Sardegna et al. (2003, 100%) et de Saunders et Knill (2003, 33%) qui, eux, ont observé une compensation pour la perturbation de la position du curseur. Le recours à une fréquence élevée de perturbations, surtout lorsque celles-ci ne sont pas détectées par le participant, peut être associée par le sujet à des processus de planification et de contrôle du mouvement qui sont très variables, comme ceux retrouvés chez un novice. Dans un tel cas, il est alors possible que celui-ci utilise des stratégies de compensation pour tenir compte de cette grande variabilité, comme

c'était le cas dans les études de perturbations mécaniques du mouvement (Abbs et Cole, 1984). Une stratégie possible serait une vérification continue de l'à-propos du mouvement, ce qui pourrait expliquer pourquoi des compensations ont été observées lorsque la fréquence de perturbation était élevée.

Les résultats de la présente étude permettent de rejeter cette hypothèse. Même si la fréquence des perturbations n'était que de 20% les participants ont néanmoins réussi à corriger la grande majorité des essais perturbés. Qui plus est, nous n'avons pas remarqué de progression dans la fréquence des essais corrigés ou dans la qualité des corrections apportées pour compenser l'introduction de la perturbation en fonction du nombre d'essais réalisés. Ces deux observations indiquent que les mécanismes activés pour corriger les essais perturbés sont disponibles dès les tous premiers essais de pratique et donc, que ce sont des mécanismes de détection des erreurs et de correction qui sont normalement mis en jeu pour tous les essais réalisés. Nous reviendrons sur ce point plus loin dans la discussion.

Une autre composante de la procédure expérimentale utilisée par Saunders et Knill (2003, 2004) pose une limite à l'interprétation des résultats. Dans leur étude, les participants devaient déplacer un curseur représentant la main vers différentes cibles visuelles. La trajectoire du curseur était masquée sur une distance de 5 cm tôt après l'amorce du mouvement. C'est durant la portion masquée de la trajectoire de la main que le curseur était déplacé. L'application du saut de curseur alors que ce dernier n'est pas visible diminue la possibilité de sa détection par les participants. Cependant, le fait de masquer transitoirement la trajectoire du curseur pourrait avoir encouragé les participants à porter une plus grande attention à son déplacement, par exemple, afin de déterminer

dans quelle portion de l'espace ce dernier redeviendra visible. Par conséquent, cette procédure pourrait avoir modifié le comportement naturel des participants en allouant une plus grande proportion de leur ressource attentionnelle aux informations visuelles. La procédure expérimentale utilisée dans notre étude permet d'éliminer cette possibilité. Néanmoins, de grandes corrections pour les sauts de curseur ont été observées.

### **La nature de la correction**

Dans la présente étude, des analyses détaillées du décours temporel des corrections motrices consécutives à l'application des sauts de curseur ont permis de caractériser la nature des corrections effectuées et d'inférer les modes de contrôle qui sous-tendent les différentes corrections observées.

Dans son étude de 2003, Nijhof a constaté que dans une tâche où la position du curseur et celle de la cible changent de place, le système est capable de mettre à jour le « feedback » reçu pendant la réalisation du mouvement en moins de 200 ms. Ce résultat suggère que la première impulsion du mouvement est modulable et le traitement de l'information afférente se fait en mode continu. Notons que dans son étude, Nijhof induisait une erreur séquentielle, ce qui peut expliquer son résultat. Les résultats de Sarlegna et al. (2003) ont indiqué que les participants corrigeaient 45% de la perturbation induite, peu importe que celle-ci ait été de 1 cm ou de 4 cm. Les résultats rapportés ne permettaient cependant pas de déterminer la nature de cette correction. Consistait-elle en une modulation de la première impulsion de mouvement (Bédard et Proteau, 2004a, 2004b; Khan et al, 2004; Lhuisset & Proteau, 2003, 2004; Proteau & Isabelle, 2002; Proteau, 2004) ou en une correction discrète qui aurait pris place après la

fin de la première impulsion de mouvement? Kerr et ses collègues ont observé dans leur étude en 1996, que la première impulsion du mouvement rapide de poursuite (autour de 400 ms) ne permettait pas une modulation pour corriger l'erreur induite. La correction exige une impulsion correctrice secondaire qui se réalise lorsque la cible et le curseur sont en vision fovéale. Ce résultat était retrouvé par Saunders et Knill (2003) qui proposaient que les corrections retrouvées dans leur étude consistaient en une modulation de la première impulsion de mouvement qui réduisait l'erreur induite de 60%. Ils ajoutaient ensuite que tous les mouvements se terminaient près de la cible (aucune valeur quantitative n'était présentée), ce qui suggérait qu'une ou des corrections discrètes avaient permis aux participants de compléter la correction requise. Les profils de déplacement rapportés dans cette étude suggèrent que cette correction discrète a pris place très tard dans le mouvement alors que le curseur était situé très près de la cible.

Les observations présentées ci-dessous soulèvent plusieurs questions importantes. Premièrement, est-ce que l'observation à l'effet que seulement 60% de la perturbation a été corrigé pendant la première impulsion de mouvement dans l'étude de Saunders et Knill (2003) indique une limite à la flexibilité des mécanismes de modulation de cette première impulsion de mouvement? Auquel cas, une correction discrète serait requise pour compléter le travail. Ou s'agit-il plutôt que la décorrélation induite par la perturbation entre les afférences proprioceptives et visuelles limite l'amplitude de la correction tant que le curseur et la cible ne sont pas visibles en vision centrale auquel moment les afférences visuelles deviendraient dominantes et permettraient de compléter tardivement la correction?



Nos résultats révèlent que la première impulsion du mouvement est insuffisante pour compléter la correction de l'erreur induite. À tous les essais, on observe des corrections discrètes qui se réalisent à la fin du mouvement quand le curseur et la cible sont en vision centrale. Ces corrections discrètes sont surtout observées pour les essais où la perturbation est dans le sens contraire au mouvement planifié. Il est plausible que la genèse d'une correction motrice dans la même direction générale que le mouvement nécessite un simple ajustement du niveau d'activité musculaire. Au contraire, la genèse d'une correction motrice dans la direction opposée au mouvement pourrait exiger la programmation d'une nouvelle commande motrice impliquant un nouveau patron d'activation musculaire afin de renverser la direction du mouvement. Cette interprétation prend en compte les coûts temporels additionnels observés lorsque la perturbation implique un changement de la direction générale du mouvement. Ce résultat était rapporté par Kerr et ses collègues (1996) dans le contexte d'une tâche de poursuite. Ces chercheurs ont démontré que le délai de correction consécutif à une perturbation du curseur (saut de curseur) dépend de la direction dans laquelle la correction doit se faire. Si la correction devait se faire dans la direction inverse au mouvement planifié, le délai de correction nécessitait de 25 à 60 ms de plus que si la correction devait se faire dans la même direction générale que le mouvement.

Ensemble, ces résultats supportent l'hypothèse selon laquelle la première impulsion du mouvement n'est pas suffisante pour compléter la correction. Ils indiquent également que la proportion des corrections qui prennent place durant la première impulsion du mouvement, varie en fonction de la direction le long de laquelle la correction doit être produite.

Dans le but de tester l'hypothèse qui propose que le système moteur utilise les informations présentes en vision périphérique afin de planifier une correction discrète à la fin du mouvement, nous avons soumis des participants à une condition expérimentale au cours de laquelle la vision du curseur représentant la main est retirée de façon imprévisible durant de la réalisation du mouvement. Dans cette condition, la vision du curseur est retirée lorsque la vitesse du déplacement de la main atteint sa valeur maximale, soit environ 60 ms à la suite de l'induction de la perturbation. Les résultats de cette expérience montrent que les participants sont toujours capables de corriger pour la perturbation et ce, avec le même pourcentage de réussite que lors d'essais où le curseur est visible durant tout le trajet du mouvement. Ce résultat démontre que la vision centrale du curseur et de la cible n'est pas nécessaire pour permettre la correction de l'erreur induite.

### **Le décalage temporel de la correction**

Nos résultats indiquent que pour la grande majorité des essais perturbés par un saut de curseur, des corrections ont pris place. De façon plus importante, l'analyse détaillée du décalage temporel de ces corrections montre que ces dernières ont été initiées durant la première impulsion du mouvement. Les résultats de ces analyses temporelles corroborent et s'ajoutent à cause d'études déjà publiées (Kerr et Lockwood, 1995 ; Bédard et Proteau, 2003 ; Saunders et Knill, 2003 )

Par exemple, dans une tâche similaire à celle de la présente étude, les coefficients de variation CDV et CEV ont diminué graduellement en fonction du temps (Proteau, 2004). On considère généralement que la réduction progressive de ces coefficients au

cours du mouvement reflète l'habileté du SNC à diminuer la variabilité du mouvement résultant du bruit dans les processus de planification motrice. Les données de la présente étude ajoutent de la portée à ces résultats. Elles indiquent que la modulation de l'impulsion initiale peut aussi intervenir afin de réduire de grandes erreurs de planification motrice. De plus, elles montrent que ces deux mécanismes de correction n'interfèrent pas entre eux.

Dans notre étude, nous avons constaté que les diminutions progressives des coefficients de variation de direction et d'amplitude montraient des décours temporels identiques dans le cas d'essais perturbés par un saut de curseur et dans le cas d'essais témoins (sans perturbation). De plus, les corrections effectuées pour compenser le saut de curseur n'ont pas généré de coût temporel. La combinaison de ces observations suggère que la réduction du bruit dans les processus de planification et la correction appliquée au saut de curseur durant la première impulsion du mouvement pourraient être assurées par les mêmes processus de correction.

Dans la présente étude, bien que le saut de curseur survenait entre 320 ms (expérience 1) et 360 ms (expérience 2 et 3) suivant l'amorce du mouvement et avant que le curseur n'ait atteint le sommet de vitesse sagittale de la première impulsion (entre 35 ms et 85 ms plus tard dépendamment de la cible et des expériences), une déviation significative de la trajectoire du curseur dans la direction opposée à la perturbation avait pris place. Cette très courte latence entre l'application de la perturbation et l'observation d'une modification significative de la trajectoire du curseur pour presque tous les essais en accord avec l'hypothèse de Saunderson et Knill (2003) à l'effet que les informations

visuelles seraient traitées de façon continue. Plusieurs autres aspects de nos résultats ne supportent cependant pas cette conclusion.

Premièrement, si les informations visuelles sont traitées en continu, des corrections complètes pour les sauts de curseur devraient être observées. Or, ce n'est ni le cas dans la présente étude, ni dans les études réalisées par Saunders et Knill (2003, 2004) et Sarlegna et ses collègues (2003, 2004). Pour expliquer ce résultat on peut présumer que les participants n'ont pas suffisamment de temps pour compléter la correction. Cette proposition est toutefois incompatible avec le fait que lors des essais qui n'impliquent pas de correction "discrète", aucune majoration de la correction ne fut observée entre le sommet de décélération (frontal) et la fin du mouvement. Or, ces deux marqueurs cinématiques étaient repérées par près de 300 ms, ce qui laissait assez de temps pour faire une correction.

Deuxièmement, dans l'expérience 3, nous n'avons pas observé de différence dans le déroulement temporel de la correction entre les essais avec et sans vision du curseur durant la deuxième portion du mouvement. Si les informations visuelles étaient continuellement traitées, des corrections plus importantes auraient été observées dans la condition avec vision durant la totalité du mouvement. À l'opposé, cette observation pourrait signifier que dans l'expérience 3, le traitement en continu des informations afférentes dépend prioritairement des informations visuelles durant la première portion et des informations proprioceptives durant la seconde portion du mouvement.

Troisièmement, dans le cadre des trois expériences réalisées dans la présente étude, nous avons constaté que la correction nécessaire à la compensation du saut de cible le long de l'axe sagittal était retardée comparativement à la correction effectuée le long

de l'axe frontal. La correction le long de l'axe sagittal est survenue entre le sommet de la décélération (frontal) et la fin du mouvement, alors que la correction le long de l'axe frontal était déjà survenue ou était même complétée au moment de l'atteinte du sommet de décélération (pour les essais ne montrant pas de correction discrète). Si les informations visuelles étaient utilisées continuellement afin de corriger d'éventuelles erreurs motrices, nous devrions être témoins de corrections continues le long des deux axes de mouvement. Une autre explication voudrait que cette observation reflète l'intervention d'un mécanisme de correction d'erreurs qui traite de façon différente les composantes directionnelle et d'amplitude de la tâche (Paillard 1980; Paillard & Amblard 1985 ; Messier & Kalaska 1999). Par exemple, il est possible que la genèse d'une correction le long de l'axe sagittal survienne plus tard dans le mouvement parce qu'elle peut être effectuée plus efficacement si le curseur est plus rapproché de la cible (Paillard 1980; Paillard & Amblard 1985). Nous avons étudié cette possibilité au cours d'une série d'expériences où un saut de curseur de 30 mm était appliqué le long de l'axe sagittal. Ces expériences ont démontré que des corrections rapides et efficaces de cette perturbation prennent place tôt après le sommet de vitesse (frontal). Ce résultat contredit le modèle de Paillard et ses collègues et corrobore certaines données récentes à l'effet que la rétine périphérique est capable de saisir les informations qui permettent de corriger la direction et l'amplitude d'une atteinte manuelle (Bédard & Proteau 2003, 2004; Saunders & Knill 2003).

Les résultats de la présente étude et ceux des travaux antérieurs ne fournissent pas d'évidence convaincante supportant l'idée que la correction pour un saut de curseur fait intervenir des processus qui traitent les afférences visuelles de façon parfaitement

continue. Dans les études de Saunders et Knill (2003, 2004) et dans celle-ci, le saut de curseur s'est produit à différents moments au cours du mouvement et d'un essai à l'autre. Néanmoins, des patrons similaires de correction ont été observés. De plus, les résultats de l'expérience 3 (voir aussi Körding and Wolpert 2004) indiquent que l'erreur induite peut être détectée et qu'une correction peut être planifiée en moins de 50 ms. La démonstration qu'une erreur peut être détectée et traitée rapidement à différents instants le long de la trajectoire de mouvement suggère que le déplacement du curseur est continuellement traité par le SNC, mais que les erreurs de mouvements ne peuvent être entièrement corrigées, en raison d'une limite temporelle dans l'implantation des corrections motrices. Dans la présente étude, un estimé conservateur de la latence nécessaire à l'implantation d'une correction est de l'ordre 35 à 85 ms. Cette très courte latence ne permet pas d'expliquer pourquoi les participants n'ont pas entièrement corrigé pour le saut de curseur lors des essais qui ne présentaient pas de correction discrète. Nos résultats suggèrent plutôt qu'il existe une limite quant à l'ordre de grandeur de la correction qui peut être effectuée par l'intermédiaire de ce système de traitement continu. Une fois cette limite dépassée, le SNC ne pourrait plus effectuer de corrections par une simple modulation fine du mouvement. Un nouveau mouvement doit plutôt être planifié, ce qui nécessite un coût temporel certain et possiblement de plus grandes ressources attentionnelles.

La limite proposée pour ce système de traitement 'pseudo-continu' des afférences visuelles pourrait être dépassée lorsque l'erreur motrice détectée est supérieure à la variabilité inter essais normalement observée pour un type de mouvement donné. Il est vraisemblable que le saut de curseur utilisé dans cette étude et dans celles de Saunders et

Knill (2003, 2004) ait provoqué le dépassement d'une telle limite. Cette interprétation pourrait expliquer les résultats de l'expérience 3. Dans cette expérience, en dépit du fait que les participants détectaient rapidement une erreur visuelle qui déclenchait des processus de correction, la présence d'informations visuelles durant la seconde portion du mouvement n'a pas produit d'amélioration additionnelle de la précision finale des mouvements. Des études subséquentes au cours desquelles les moments où ces perturbations sont induites et au cours desquelles la taille de ces perturbations seront systématiquement manipulés devraient permettre de mettre en évidence les résolutions temporelle et spatiale propres à ce mécanisme de traitement pseudo-continu.

### **Les corrections motrices sont fonctionnelles**

Les résultats de la présente étude démontrent clairement que les mécanismes de correction d'erreur en temps réel sont fonctionnels; ils sont hautement modulés en fonction du contexte de la tâche afin de permettre l'atteinte de l'objectif convoité. En effet, nos données indiquent que les corrections qui prennent place afin de compenser pour le saut de curseur ne consistent pas en de simples modifications de la trajectoire de la main de taille et de direction opposée à la perturbation induite. Plutôt, nos résultats démontrent que la taille des corrections qui prennent place est adaptée à l'écart entre la position de la main et celle de la cible à atteindre. Par exemple, dans l'expérience 3, le segment initial de la trajectoire de la main était fréquemment dans la même direction que la correction requise. Par conséquent, la taille de la correction nécessaire pour atteindre la cible était nettement inférieure à la taille de la perturbation induite. Néanmoins, les corrections observées étaient finement étalonnées afin d'atteindre la cible avec précision

et, par conséquent, ne montraient pas le patron de surestimation prédit par un simple ajustement ayant pour objectif de ramener la main sur sa trajectoire initiale.

En conclusion, les résultats des expériences présentées dans ce mémoire supportent l'hypothèse à l'effet que des mécanismes de correction d'erreurs rapides, automatiques et fonctionnels existent dans le système moteur. L'existence de tels mécanismes de traitement et de corrections à haute résolution temporelle est importante pour permettre des ajustements rapides lors de perturbations imprévisibles qui se manifestent dans le cadre de diverses interactions quotidiennes avec l'environnement.



## **BLIBLIOGRAPHIE**

- Abahnini, K. & Proteau, L. (1999). The role of peripheral and central visual information for the directional control of manual aiming movements. Canadian Journal of Experimental Psychology, 53 : 160-175.
- Abahnini, K., Proteau, L. & Temprado, J.J. (1997). Evidence supporting the role of peripheral visual information for the directional control of aiming movement. Journal of Motor Behavior, 29 : 230-242.
- Abbs, J.H., Gracco, V.L. & Cole, K.J. (1984). Control of multimovement coordination: sensorimotor mechanisms in speech motor programming. Journal of Motor Behavior, 16(2) : 195-231.
- Bard, C., Hay, L. & Fleury, M. (1985). Role of peripheral vision in the directional control of rapid aimed movement. Canadian Journal of Psychology, 39 : 151-161.
- Bard, C., Paillard, J., Fleury, M., Hay, L. & Larue, J. (1990). Positional versus directional control loops in visuomotor pointing. Cahiers de Psychologie Cognitive, 10 : 145-156.
- Beaubaton, D. & Hay, L. (1986). Contribution of visual information to feedforward and feedback processes in rapid pointing movements. Human Movement Science, 5 : 19-34.
- Bédard, P. & Proteau, L. (2003). On the role of peripheral visual afferent information for the control of rapid video-aiming movements. Acta Psychologica, 113 : 99-117.
- Bédard, P. & Proteau, L. (2004). On-line vs off-line utilization of peripheral visual afferent information to ensure spatial accuracy of good-directed movements. Experimental Brain Research, 158 : 75-85.
- Beggs, W. D. & Howarth, C.I. (1970). Movement control in a repetitive motor task. Nature, 225 : 752-753.
- Blouin, J., Bard, C., Teasdale, N. & Fleury, M. (1993). On-line versus off-line control of rapid aiming movements. Journal of Motor Behavior, 25 : 275-279.
- Capaday, C. & Cooke, J.D. (1981). The effects of muscle vibration on the attainment of intended final position during voluntary human arm movements. Experimental Brain Research, 42(2) : 228-230.
- Carlton, L.G. (1981). Processing visual feedback information for movement control. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 7 : 1019-1030.

- Cooper, S.E., Martin, J.H. & Ghez, C. (2000). Effects of inactivation of the anterior interpositus nucleus on the kinematic and dynamic control of multijoint movement. Journal of Neurophysiology, 84(4) : 1988-2000
- Desmurget, M., Jordan, M., Prablanc, C. & Jeannerod, M. (1997). Constrained and unconstrained movements involve different control strategies. Journal of Neurophysiology, 77 : 1644-1650.
- Desmurget, M., Rossetti, Y., Prablanc, C., Stelmach, G.E. & Jeannerod, M. (1995). Representation of hand position prior to movement and motor variability. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 73 : 262-272.
- Desmurget, M., Epstein, C.M., Turner, R.S., Prablanc, C. & Alexander, G.E. (1999). Role of the posterior cortex in updating reaching movements to a visual target. Natural Neuroscience, 2(6) : 563-567.
- Dizio, P. & Lackner, J.R. (2000). Cargenitally blind individuals rapidly adapt to cariolis force perturbations of their reaching movements. Journal of Neurophysiology, 84 : 2175-2180.
- Flash, T. & Hogan, L. (1985). The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. Journal of Neuroscience, 5(7) : 1688-1703.
- Forget, R. & Lamarre, Y. (1987). Rapid elbow flexion in the absence of proprioceptive and cutaneous feedback. Human Neurobiology, 6 : 27-37.
- Georgopoulos, A.P., Kalaska, J.F. & Massey, J.T. (1981). Spatial trajectories and reaction times of aimed movements : effects of practice, uncertainty, and change in target location. Journal of Neurophysiology, 64 : 725-743.
- Ghez, C., Gordon, J. & Ghilardi, M.F. (1995). Impairments of reaching movements in patients without proprioception : II. Effect of visual information on accuracy. Journal of Neurophysiology, 73 : 361-372.
- Goodale, M.A., Péllisson, D. Prablanc, C. (1986). Large adjustments in visually guided reaching do not depend on vision of the hand or perception of target displacement. Nature, 320 : 748-750.
- Gordon, J., Ghilardi, M.F., Ghez, C. (1995). Impairments of reaching movements in patients without proprioception. I. Spatial errors. Journal of Neurophysiology, 73 : 347-360.

- Gordon, J., Ghilardi, M.F. & Ghez, C. (1994). Accuracy of planar reaching movements : I. Independence of direction and extent variability. Experimental Brain Research, 99 : 97-111.
- Hay, L. & Beaubaton, D. (1986). Visual correction of a rapid goal-directed response. Perception Motor Skills, 62(1) : 51-57
- Inglis, J.T., Frank, J.S. & Inglis, B. (1991). The effect of muscle vibration on human position sense during movements controlled by lengthening muscle contraction. Experimental Brain Research, 84(3) : 631-634.
- Keele, S.W. (1968). Movement control in skilled motor performance. Psychological Bulletin, 70 : 387-403.
- Keele, S.W. & Posner, M.I. (1968). Processing of visual feedback in rapid movements. Journal of Experimental Psychology, 77 : 155-158.
- Kerr, G., Fox, P. & Stein, J.F. (1996). Corrections to unexpected visual changes in the perceived position of the hand during rapid movements. Human Movement Science, 15 : 763-786.
- Kerr, G. & Lockwood, R.J. (1995). Amplitude scaling compensates for serial delays in correcting eye and arm movements. Journal of Motor Behavior, 27 : 349-365.
- Khan, M.A., Lawrence, G.P., Franks, I.M. & Buckolz, E. (2004). The utilization of visual feedback from peripheral and central vision in the control of direction. Experimental Brain Research, 158(1) : 241-151.
- Komilis, E., Péliisson, D. & Prablanc, C. (1993). Error processing in pointing at randomly feedback-induced double-step stimuli. Journal of Motor Behavior, 25 : 229-308.
- Körding, K.P. & Wolpert, D.M. (2004). Bayesian integration in sensorimotor learning. Nature, 427 : 244-247.
- Lackner, J.R. & Dizio, P. (1994). Rapid adaptation to coriolis force perturbations of arm trajectory. Journal of Neurophysiology, 72(1) : 299-313.
- Lacquaniti, F. & Soechting, J.F. (1984). Behavior of the stretch reflex in a multi-jointed limb. Experimental Brain Research, 311(1) : 161-166.
- Lacquaniti, F. & Soechting, J.F. (1986). Responses of mono- and bi-articular muscles to load perturbations of the human arm. Experimental Brain Research, 65 : 135 -144.

- Lacquaniti, F. & Soechting, J.F. (1986). EMG responses to load perturbations of the upper limb : effect of dynamic coupling between shoulder and elbow motion. Experimental Brain Research, 61 : 482-496.
- Lhuisset, L. & Proteau, L. (2002). Developmental aspects of the control of manual aiming movements in aligned and non-aligned visual displays. Experimental Brain Research, 146(3) : 293-306.
- Lhuisset, L. & Proteau, L. (2004). Visual control of manual aiming movements in 6-to 10-year-old children and adults. Journal of Motor Behavior, 36(2) : 161-172.
- Lhuisset, L. & Proteau, L. (2004). Planning and control of straight-ahead and angled planar movements in adults and young children. Canadian Journal of Experimental Psychology, 58(4) : 245-258.
- Messier, J. & Kalaska, J.F. (1999). Comparison of variability of initial kinematics and endpoints of reaching movements. Experimental Brain Research, 125(2) : 139-152.
- Messier, J., Adomovich, S., Berkinblit, M., Tunik, E. & Poizner, H. (2003). Influence of movement speed on accuracy and coordination of reaching movements to memorized targets in three-dimensional space in a deafferented subject. Experimental Brain Research, 150 : 399-416.
- Nijhof, E.J. (2003). Online trajectory modifications of planar goal-directed arm movements. Human Movement Science, 22 : 13-26.
- Paillard, J. (1980). The multichanneling of visual cues and the organization of visually guided response. In G.E. Stelmach & J. Requin (Eds.). Tutorials in Motor Behavior (pp. 259-279). Amsterdam : North-Holland.
- Paillard, J. & Amblard, B. (1985). Static versus dynamic visual cues for the processing of spatial relationships. In M. Jeannerod & D. N. Lee (Eds.). Brain Mechanism in Spatial Vision (pp. 367-385). La Haye : Martinus Nijhoff.
- Péllisson, D., Prablanc, C., Goodale, M.A. & Jeannerod, M. (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb. II. Evidence of fast unconscious processes correcting the trajectory of the hand to the final position of a double-step stimulus. Experimental Brain Research, 62 : 303-311.
- Prablanc, C., Echallier, J.E., Jeannerod, M. & Komilis, E. (1979). Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target. II. Static and dynamic visual cues in the control of hand movement. Biological Cybernetics, 35 : 183-187.

- Prablanc, C. & Martin, O. (1992). Automatic control during hand reaching at undetected two-dimensional target displacements. Journal of Neurophysiology, 67 : 455-469.
- Proteau, L. & Isabelle, G. (2002). On the role of visual afferent information for the control of aiming movements toward targets of different sizes. Journal of Motor Behavior, 34 : 367-384.
- Proteau, L. (2004). Visual afferent information dominates other sources of afferent information during mixed practice of a video-aiming task. Experimental Brain Research, 161 (4) : 441-456.
- Robin, C., Blandin, Y., Toussaint, L., & Proteau, L. Specificity of learning in a video-aiming task: modifying the salience of dynamic visual cues. Journal of Motor Behavior. (accepté pour publication).
- Rossetti, Y., Stelmach, G., Desmurget, M., Prablanc, C. & Jeannerod, M. (1994). The effect of viewing the static hand prior to movement onset on pointing kinematics and variability. Experimental Brain Research, 101 : 323-330.
- Rossetti, Y., Desmurget, M. & Prablanc, C. (1995). Vectorial coding of movement : vision, proprioception, or both? Journal of Neurophysiology, 74 : 457-463.
- Rothwell, J.C., Traub, M.M., Day, B.L., Obson, J.A., Thomas, P.K. & Marsden, C.D. (1982). Manual motor performance in a deafferented man. Brain, 105 : 515-542.
- Sainburg, R.L., Poizner, H. & Ghez, C. (1993). Loss of proprioception produces deficits in interjoint coordination. Journal of Neurophysiology, 70 : 2135-2147.
- Sainburg, R.L., Ghilardi, M.F., Poinzner, H. & Ghez, C. (1995). Control of limb dynamics in normal subjects and patients without proprioception. Journal Neurophysiology, 73 : 820-835.
- Sainburg, R.L., Ghez, C. & Kalakanis, D. (1999). Intersegmental dynamics are controlled by sequential anticipatory, error correction, and postural mechanisms. Journal of Neurophysiology, 81(3) : 1045-1056.
- Sanes, J.N., Mauritz, K.H., Dalakas, M.C. & Evarts, E.V. (1985). Motor control in human with large-feber sensory neuropathy. Human Neurobiology, 4 : 401-114.
- Sarlegna, F., Blouin, J., Bresciani, J.P., Bourdin, C., Vercher, J.L. & Gauthier, G.M. (2003). Target and hand position information in the online control of goal-directed arm movements. Experimental Brain Research, 151(4) : 524-535

- Sarlegna, F., Blouin, J., Vercher, J.L., Bresciani, J.P., Bourdin, C. & Gauthier, G.M. (2004). Online control of the direction of rapid reaching movements. Experimental Brain Research, 157: 468-471.
- Saunders, J.A. & Knill, D.C. (2003). Humans use continuous visual feedback from hand to control fast reaching movements. Experimental Brain Research, 192: 341-352.
- Saunders, J.A. & Knill, D.C. (2004). Visual feedback control of hand movements. Journal of Neuroscience, 24: 3223-3234.
- Siino-Sears, V., Dizio, P. & Lackner, J.R. Rotation velocity influences the magnitude of deviations or arm reaching movements. Society for neuroscience abstract. In Dizio, P. & Lackner, J.R. (2000). Congenitally blind individuals rapidly adapt to coriolis force perturbations of their reaching movements. Journal of physiology 84(4): 2175-80
- Smith, W.M. & Bowen, K.F. (1980). The effects of delayed and displaced visual feedback on motor control. Journal of Motor Behavior, 12: 91-101.
- Verschueren, S.M.P., Swinnen, S.P., Cordo, P.J. & Dounskaia, N.V. (1999). Proprioceptive control of multijoint movement: bimanual circle drawing. Experimental Brain Research, 127: 182-192.
- Vince, M.A. (1948). Corrective movements in a pursuit task. Quately Journal of Experimental Psychology, 1: 85-106.
- Vindras, P., Desmurget, M., Prablanc, C. & Viviani, P. (1998). Pointing errors reflect biases in the perception of the initial hand position. Journal of Neurophysiology, 79: 3290-3294.
- Vindras, P. & Viviani, P. (1998). Frames of reference and control parameters in visuomanual pointing. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 24: 569-591.
- Woodworth, R.S. (1999). The accuracy of voluntary movement. Psychological Review, 3 (monograph supplements): 1-119.
- Zelaznik, H.N., Hawkins, B. & Kisselburgh, L. (1983). Rapid visual feedback processing in single-aiming movements. Journal of Motor Behavior, 15: 217-236.

