

Université de Montréal

***Spécialisation hémisphérique dans le contrôle des mouvements d'atteinte
chez les patients hémiparétiques***

par

Danilo Esparza Y

Département de physiologie

Faculté de médecine

Mémoire présentée à la Faculté des études supérieures

En vue de l'obtention du grade de

Maître ès sciences (M.Sc) en Sciences Neurologiques

Décembre 2001

© Danilo Esparza Y, 2001



w

4

U58

2002

v. 071

Page d'identification du jury

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

*Spécialisation hémisphérique dans le contrôle des mouvements d'atteinte chez
les patients hémiparétiques*

présente par :

Danilo Esparza Y

à été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Président-rapporteur.	John Kalaska
Directeur de recherche	Mindy F. Levin
Membre du jury	Trevor Drew

Mémoire accepté le :

RÉSUMÉ

L'asymétrie manuelle est une caractéristique intrinsèque de la performance motrice qui favorise l'utilisation d'une main pour l'exécution de mouvements d'habileté. Des études antérieures ont démontré que cette asymétrie est le résultat d'un contrôle préférentiel par l'hémisphère dominant (l'hémisphère gauche pour les droitiers et le droit pour les gauchers). Ces différences hémisphériques deviennent plus évidentes chez les sujets qui ont subi un trouble neurologique comme par exemple un accident vasculo-cérébral. Plusieurs études chez les patients hémiparétiques droitiers démontrent qu'il existe des déficits majeurs pour l'exécution d'un mouvement après une lésion dans l'hémisphère gauche. Ces déficits dans le contrôle du mouvement, spécialement lorsque les sujets hémiparétiques utilisent le bras non-parétique, se produisent généralement pendant l'exécution de mouvements séquentiels. Des analyses cinématiques ont enregistré des différences significatives dans la durée d'exécution et la précision du mouvement lorsque les sujets hémiparétiques effectuent une tâche qui comporte différents degrés de difficulté. Cependant, toutes ces études analysent les asymétries motrices en utilisant la musculature distale. Pour la première fois, des différences hémisphériques dans la coordination temporelle du mouvement entre la musculature proximale et distale ont été étudiées dans ce mémoire. Nous avons utilisé un mouvement de pointage pour analyser la coordination temporelle tronc-bras chez deux groupes de sujets hémiparétiques qui ont utilisé le bras non-parétique. Deux conditions de mouvement vers différents types de cibles nous ont permis d'analyser cinématiquement un mouvement de coordination simple et un autre complexe.

Les mouvements effectués par les sujets hémiparétiques en utilisant le bras non-parétique ont été comparés avec ceux de sujets sains qui ont utilisé le même bras que les sujets hémiparétiques. Les résultats de notre étude ont démontré une variabilité significative dans le délai entre les mouvements du bras et du tronc au début et à la fin du mouvement dans les deux groupes de sujets hémiparétiques en comparaison aux sujets sains. Cette variabilité est encore plus évidente lors de l'exécution d'un mouvement de coordination complexe. Les autres paramètres cinématiques analysés ont été similaires à ceux des sujets sains, excepté dans le cas du déplacement du tronc. Les sujets hémiparétiques avec une lésion dans l'hémisphère dominant déplacent moins le tronc que les sujets avec lésion dans l'hémisphère non-dominant. Cependant, ces différences dans le déplacement du tronc pourraient être associées à des problèmes d'ordre distinct n'étant pas en relation avec un contrôle latéralisé de la musculature du tronc. Par contre, la performance motrice n'a pas été affectée lorsque les sujets hémiparétiques ont utilisé le bras non-parétique pour effectuer le mouvement. Nos résultats suggèrent que la coordination temporelle tronc-bras n'est pas préférentiellement contrôlée par l'hémisphère dominant. Ces résultats sont contradictoires à la plupart des études qui démontrent un contrôle latéralisé de l'hémisphère dominant pour les mouvements exécutés avec la musculature distale du bras non-parétique à différents degrés de difficulté.

Mots Clés : Accident vasculo-cérébral – Dominance cérébrale – Timing – Coordination multi-articulaire – Contrôle moteur.

SUMMARY

Manual asymmetry is an intrinsic characteristic of motor performance which favors the preferential utilisation of one hand to perform skill tasks. Previous studies have demonstrated that this asymmetry is the result of preferential control by the dominant hemisphere. This is for right handed people, the left hemisphere, and the opposite for those who are left-handed. Hemispheric differences become more evident in the presence of neurological problems such as a cerebro-vascular accident. Several studies of right hemiparetic patients have demonstrated major deficits in the performance of movement with either the paretic or nonparetic arm. Differences in the control with the nonparetic arm movement are generally noted during the execution of sequential movement. Kinematic analysis suggests that there are significant differences in the duration and the precision of the performance of tasks requiring higher levels of difficulty (degrees of complexity). However, all these studies have analysed the asymmetry due to movement involving the distal musculature. This is the first time that the hemispheric differences related to the temporal coordination between proximal and distal muscles were examined. We used a pointing task to analyse the temporal coordination of the trunk and arm in two groups of hemiparetic subjects moving with the non-paretic arm. One group of patients had lesions in the dominant hemisphere and the other group had lesions in the non-dominant hemisphere. Two movement conditions permitted the analysis of simple and complex coordinated movement. The movements of the non-paretic arm in hemiparetic subjects were compared with those of healthy subjects. The results of our study demonstrated a significant variability

in the delay for the initiation and the termination of movement in the two groups of hemiparetic subjects compared to the healthy. This variability was more evident when subjects performed complex movement. The other kinematics parameters of cinematic analysis were similar to the healthy subjects except for the trunk displacement. The hemiparetic subjects with lesions in the dominant hemisphere displaced the trunk less than those with lesions in the non-dominant hemisphere. However, these differences in trunk displacement may have been due to the bilateral representation of the trunk muscles. In contrast to this, motor performance was not affected in conditions in which the hemiparetic subjects used the non-paretic arm to perform the movement. Our results suggest that trunk-arm temporal coordination is not preferentially controlled by the dominant hemisphere. These results contradict the results of most previous studies which show the lateralized control of the dominant hemisphere for movements performed with the distal muscles of the non-paretic arm at different levels of difficulty.

Key words : Stroke – Cerebral Dominance – Timing – Multi-joint Coordination – Motor Control.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux et figures.....	IX
Liste de abréviations	X
Liste de coauteurs de l'article.....	XI
Dédicace	XII

Chapitre I

Introduction	1
La dominance cérébrale et le contrôle du mouvement.....	3
Production de la tâche de pointage.....	7
Mouvement de pointage et dominance cérébrale	11
Le contrôle du tronc et le problème de la redondance	15

Chapitre II

2.1 Problématique	21
2.2 Article	24
2.2.1 Abstract	25
2.2.2 Introduction.....	27
2.2.3 Materials and methods	29
2.2.4 Results.....	36
2.2.5 Discussion	47
2.2.6. References.....	51

Chapitre III

3.1 Discussion	56
3.1.1 Analyses Cinématique.....	56
3.1.2 Différences cinématiques entre l'utilisation du bras non-parétique et parétique en comparaison aux sujets sains ...	58
3.1.3 La coordination temporelle tronc-bras chez des sujets hémiparétiques	59
3.1.4 Recrutement et contrôle du tronc.....	63
3.2 Conclusion	66
3.3 Bibliographie	68

LISTE DE TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1	Données démographiques et cliniques des sujets hémiparétiques.....	31
Figure 1	Représentation de la tâche expérimentale.....	34
Figure 2	Profils de vitesse tangentielle et trajectoires du bras et du tronc...	38
Figure 3	Déplacement du tronc dans toutes les conditions et cibles.....	40
Figure 4	Moyennes et écartypes de délais tronc-bras pour le début et la fin du mouvement.....	42
Figure 5	Délais individuels bras-tronc pour le début et la fin du mouvement dans la condition «en phase» ipsilatérale.....	44
Figure 6	Coefficient de variabilité (SD) pour le délai tronc-bras.....	46

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

AMSc : Aire motrice supplémentaire caudale.

AMV : Aire motrice supplémentaire ventrale.

AVC : Accident vasculaire cérébral.

CP : Cortex pariétal.

FSRc : Flux sanguin régional cérébral.

IPA : Aire intra pariétale antérieure.

IPM : Aire intra pariétale médiale.

M1 : Cortex moteur primaire.

PDM : Aire pariétale dorsale médiale.

PM : Cortex pré-moteur.

PMd : Aire prémotrice dorsale.

PMv : Aire pré-moteur ventrale.

PO : Aire pariéto-occipitale

PS : Cortex pariétal supérieur.

SMT : Stimulation magnétique transcrânienne.

TEP : Tomographie à émission de positrons.

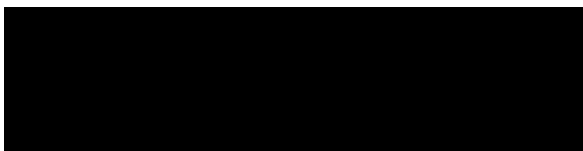
LISTE DES COAUTEURS DE L'ARTICLE

Titre de l'article : Hemispheric specialization in the temporal coordination of
arm and trunk movements during pointing in stroke patients.

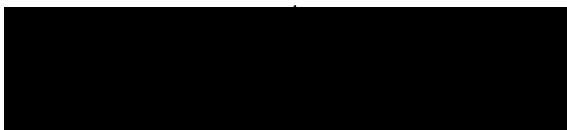
Sera soumis à : Brain Research

Coauteurs : P. Archambault, C. J. Winstein, M. F. Levin

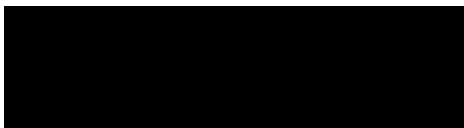
Nous autorisons l'Université de Montréal de mettre ce mémoire à la disposition des lecteurs dans les bibliothèques de l'université ou dans d'autres bibliothèques. Nous autorisons également l'Université de Montréal à microfilmer ce mémoire



Philippe Archambault



Carolee Winstein



Mindy F. Levin

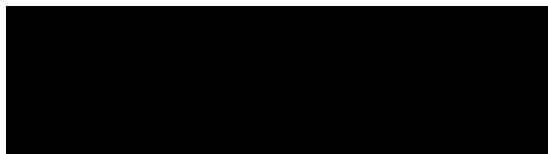
LISTE DES COAUTEURS DE L'ARTICLE

Titre de l'article : Hemispheric specialization in the temporal coordination of arm and trunk movements during pointing in stroke patients.

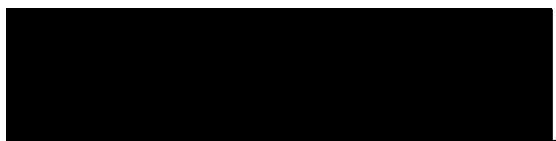
Sera soumis à : Brain Research

Coauteurs : P. Archambault, C. J. Winstein, M. F. Levin

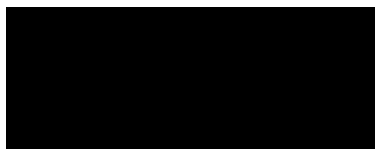
Nous autorisons l'Université de Montréal de mettre ce mémoire à la disposition des lecteurs dans les bibliothèques de l'université ou dans d'autres bibliothèques. Nous autorisons également l'Université de Montréal à microfilmer ce mémoire



Philippe Archambault



Carolee Winstein



Mindy F. Levin

DÉDICADE

Je souhaite remercier ma directrice, Mindy F. Levin, de m'avoir donné la chance d'acquérir une formation en recherche, pour ses conseils, son enseignement et son soutien. Je remercie également mes parents, la «FUVIRESE» et toute l'équipe de personnes qui travaille dans le laboratoire du contrôle moteur à l'IRM.

CHAPITRE I

1.1 Introduction.

L'asymétrie manuelle est une caractéristique intrinsèque de la performance motrice que favorise l'utilisation d'une main préférentielle pour l'exécution des mouvements d'habileté. Initialement, l'hémisphère gauche était considéré comme l'hémisphère dominant en raison des déficits observés dans l'expression du langage. De nombreuses évidences suggèrent que la parole n'est qu'une des multiples fonctions siégeant principalement dans l'hémisphère gauche du cerveau. L'observation d'une asymétrie dans la performance motrice entre les bras gauche et droit est à l'origine d'une série d'expériences exploratoires des fonctions assumées par l'hémisphère dit «dominant». À cet effet, plusieurs études en utilisant des techniques et des appareils de plus en plus sophistiqués confirment la spécialisation des hémisphères dans l'accomplissement de certaines fonctions motrices.

Au départ, les études d'asymétries motrices entre les membres supérieurs visaient l'étude de tâches manuelles d'habileté et de dextérité où des paramètres tel que le temps et la précision du mouvement ont été évalués. Aujourd'hui, la méthodologie permet d'évaluer les composantes de l'intégration sensori-motrice en fonction des tâches utilisées. Ces tâches peuvent être divisées en deux groupes : les tâches simples et les tâches complexes. Les tâches sensori-motrices dites simples sont caractérisées par la réception d'une ou plusieurs stimulations sensorielles accompagnées par l'exécution d'une

seule réponse motrice uni ou multi-articulaire (par exemple : des mouvements de pointage ou d'atteinte). Par contre, les tâches sensori-motrices complexes ont une composante cognitive. Elles se caractérisent par la réception de plusieurs stimulations sensorielles pouvant produire diverses réponses motrices multi-articulaires (par exemple: la tâche de Fitts ou les mouvements séquentiels). L'étude de ces tâches permet l'évaluation de nombreux paramètres. Ces paramètres sont : la vitesse maximale, l'accélération, les mouvements articulaires, la coordination de l'activité musculaire, les réponses réflexes, la production du torque, le temps de réaction, le temps total de mouvement, la forme de la trajectoire au point final, la précision du mouvement, la synchronisation des mouvements des différents segments corporels, etc. La neuroimagerie ainsi que certaines autres techniques dont la stimulation électrique intra-corticale chez l'animal et trans-corticale chez l'humain, nous a permis de mieux connaître les processus anatomo-physiologiques qui soutiennent les différences au niveau des hémisphères cérébraux.

Notre étude a porté sur le rôle de la dominance hémisphérique dans le contrôle de la coordination tronc – bras lors de l'exécution d'une simple tâche de pointage. La cinématique de ces mouvements a été analysée chez les sujets sains et des sujets hémiparétiques utilisant leur bras non-parétique. Plusieurs études ont démontré la présence de déficits moteurs au niveau du bras ipsilatéral (non-parétique) à la lésion. De façon plus spécifique, ces déficits moteurs concernent le temps d'initiation du mouvement, le transport de la main ou de la précision du mouvement. Ces atteintes hémisphériques et les déficits sous-jacents à ces dernières sont des arguments pour une spécialisation

hémisphérique. Cependant, la plupart de ces études ne décrivent pas des paramètres sensoriels qui pourraient influencer les résultats.

Dans la première partie de ce mémoire, une brève révision de la notion de dominance cérébrale et du contrôle du mouvement sera faite. Puis, une description des mécanismes centraux impliqués dans la régulation du mouvement de pointage suivra. Finalement, le contrôle du tronc et le problème de la redondance seront analysés.

La deuxième partie du mémoire concernera l'hypothèse de travail. Elle sera présentée parallèlement à la description d'une expérience faite chez des sujets sains et des sujets hémiparétiques concernant la dominance hémisphérique et son influence sur le contrôle inter-segmentaire. En troisième partie, la discussion et la conclusion seront présentées. Fait important à noter, les études sur le transfert inter-hémisphérique seront omises car elles dépassent le cadre de cette étude. Signalons aussi que la presque totalité de la littérature présentée est directement en relation avec les déficits moteurs sur le bras sain de l'hémiparétique.

1.2 La dominance cérébrale et le contrôle du mouvement

La première notion d'une différence entre les deux hémisphères pour la programmation du mouvement a été proposée par Liepmann (1913). Des différences motrices ont été observées entre le bras droit et gauche d'un patient apraxique ayant une compréhension du langage préservée. L'auteur a suggéré que l'hémisphère gauche est l'hémisphère dominant pour la programmation motrice chez les sujets droitiers. Plus tard, les études sur les habiletés motrices

chez les sujets droitiers neurologiquement sains démontrent la dominance de l'hémisphère gauche lors de la réalisation de tâches tels les mouvements rythmiques faits avec le bout de doigt, le découpage de formes avec des ciseaux, la placement des chevilles de bois dans des trous et la manipulation de petits objets (Benton et al. 1962; Provins et Cunliffe 1972; Rapin et al. 1966; Satz et al. 1967; Zurif et Carson 1970). Par la suite, une grande variété d'évidences cliniques chez les patients apraxiques ou ayant d'autres déficits dans des habilités motrices ont été documentés et les résultats corroborent l'idée émise par Liepmann (Dee et al. 1970; Heilman et al. 1975; Kimura 1977; Mateer et Kimura 1977). La notion d'un hémisphère spécialisé s'applique non seulement au contrôle de la musculature des extrémités, mais aussi au contrôle de la musculature orale et faciale comme le démontrent les expériences sur les mouvements verbaux et non verbaux de la bouche (Graves 1983; Graves et Landis 1985; Goodale 1988). Cependant, il faut noter que la production de la parole est une tâche séquentielle complexe.

Des différences hémisphériques dans le contrôle du mouvement pourraient être établies spécifiquement au niveau cortical où l'intégration sensori-motrice est plus complexe qu'aux autres niveaux du SNC. Cette complexité peut être en relation avec la participation de plusieurs systèmes (visuels, somesthésiques, auditifs...). De plus, au niveau cortical des informations sensorielles participent à un processus cognitif spécial : la planification d'une réponse motrice adéquate. Cette planification du mouvement est un processus cognitif complexe. Plusieurs expériences supportent une latéralisation hémisphérique permettant le contrôle des processus cognitifs -

moteurs. Par exemple, Kimura et Archibald (1974) ont analysé les différences dans la performance motrice en rapport à l'apprentissage moteur. Les conclusions de ces études suggèrent que les sujets ayant subi des dommages au niveau de l'hémisphère dominant ont de la difficulté à apprendre des tâches manuelles complexes. Ces résultats, qui sont consistants avec les études effectuées chez les sujets sains par Taylor et Heilman (1980), indiquent que les sujets droitiers sont capables d'acquérir de nouvelles habiletés motrices plus rapidement avec le bras droit qu'avec le bras gauche. D'autres études, en utilisant des analyses cinématiques, démontrent des asymétries hémisphériques pour l'exécution de mouvements séquentiels (Haaland et Harrington 1996) et de dextérité (Sunderland et al 1999). Ces mouvements requièrent un haut degré d'attention pour éviter d'échouer en pointant la cible. Une évidence récente, utilisant la tomographie à émission de positrons (TEP), démontre qu'un procès cognitif comme l'attention dans l'exécution des mouvements des extrémités pour atteindre la cible, «attention motrice», est lateralisée. Des changements dans le flux sanguin régional au niveau cérébral (FSRc) permettent de mettre l'accent sur la dominance de cette fonction dans l'hémisphère gauche (Rushworth et al. 2001). Cette dernière évidence supporterait l'idée que toutes les tâches motrices requérant de l'attention auraient tendance à être contrôlées par l'hémisphère gauche chez les sujets droitiers. Cependant, certaines études suggèrent que l'hémisphère droit revêt une importance prépondérante pour certains processus cognitifs comme l'orientation visuo-spatiale, la manipulation visuo-motrice et la programmation du mouvement (Goodale 1988; Winstein et

Pohl 1995; Rich et al. 1995; Vingerhoets et Stroobant 1999). Ces processus cognitifs participent aussi à l'élaboration du mouvement.

Des différences physiologiques entre les deux cortex moteurs ont aussi été trouvées. La SMT a été utilisée pour évaluer les seuils d'activation électromyographiques d'un même muscle chez deux groupes de sujets sains (gauchers et droitiers). Chez les sujets droitiers, il y a une augmentation de l'excitabilité dans le cortex dominant observée par une diminution dans le seuil d'activation des muscles de la main droite (Triggs et al. 1994). Cette diminution du seuil faciliterait l'activation rapide des muscles de la main préférentielle.

D'autres études ont plutôt rapporté des asymétries hémisphériques au niveau de la structure du cortex moteur. Par exemple, Amunts (1996) a décrit une différence dans la profondeur du sillon central. Le sillon central gauche est plus profond que le droit chez des sujets droitiers alors que c'est le contraire chez des sujets gauchers. Cette augmentation de volume pourrait résulter d'une augmentation des connexions intra-corticales favorisant l'utilisation de la main controlatérale. Une autre étude sur la représentation de la main dans la cortex moteur démontre un accroissement de cette représentation dans le cortex controlatéral à la main préférentielle (Wassermann et al. 1992; Volkman et al. 1998).

Toutes ces évidences démontrent une claire dominance hémisphérique chez les sujets sains et les patients qui ont subi des lésions dans l'hémisphère gauche. Le mécanisme responsable de cette spécialisation hémisphérique pour l'exécution des mouvements reste encore inconnu. Cependant, deux hypothèses pourraient expliquer ce probable mécanisme. La première est que

cette spécialisation hémisphérique soit codée génétiquement mais cette hypothèse n'a pas été vérifiée. L'autre possibilité est que la dominance cérébrale soit le produit de l'entraînement constant d'une extrémité de façon préférentielle et spécifique dès un âge précoce. Cet entraînement produira les changements au niveau cellulaire qui permettraient à la fois d'optimiser l'efficacité synaptique et de créer différentes connexions internes pouvant éventuellement mener à cette spécialisation hémisphérique. Cependant, il est possible que la dominance hémisphérique résulte d'un mélange de facteurs génétiques et de performance motrice acquis de l'expérience motrice en bas âge.

1.3 Production de la tâche de pointage

La tâche de pointage est l'action de mener la main vers une cible prédéterminée après un signal. Cette tâche est utilisée pour étudier les mouvements volontaires impliquant l'action coordonnée de plusieurs muscles et articulations du membre supérieur ainsi que du tronc. En plus, la tâche de pointage permet d'analyser des interactions sensori-motrices entre une stimulation de localisation spatiale et une réponse motrice. Cette interaction entre différents types de stimulations sensorielles et la direction adéquate du mouvement orienté vers la cible déterminent la performance motrice lors du mouvement de pointage. Des stimulations sensorielles de types distincts (visuels, auditifs, proprioceptifs...) fournissent des informations de nature différente au SNC. En effet, elles sont transmises par des structures

anatomiques distinctes qui activent différentes aires corticales ayant des points communs de convergence tels que le thalamus et le cortex pariétal (CP).

Pour l'exécution des mouvements de pointage, la transformation visuo-motrice joue un rôle spécial puisque l'extension et la direction du mouvement dépendent de la localisation de la cible dans l'espace. Des enregistrements neuronaux démontrent que le CP permet des interactions entre des processus qui lient la sensation à l'action pour laquelle des transformations sensori-motrices sont nécessaires (Flanders et al. 1992; Jeannerod et al. 1995; Goodale 1996; Kalaska 1996; Sakata et al. 1997; Andersen et al. 1997). Plus spécifiquement, le cortex pariétal postérieur «aires 5 et 7» intègre des inputs provenant de différents systèmes, comme par exemple le système visuel (Kalaska 1996; Goodale 1998), le somatique (Flanders et al. 1992; Kertzman et al. 1997; Savaki et al. 1997), l'auditif et du système fonctionnel de la mémoire «de l'hippocampe» (Kandel 2000). La planification visuo-motrice se produit spécifiquement dans l'aire pariétale 5 (Kalaska 1996; Caminiti et al. 1996). Cette région est aussi impliquée dans le codage des aspects cinématiques du mouvement (Kalaska et al. 1990), la représentation kinesthésique du schème corporel, la posture et le mouvement (Sakata et al. 1973, Mackay et al. 1978; Hyvarinen et al. 1982; Kalaska 1988). Chez les singes, les mouvements de pointage et de préhension ont des voies de mouvement différentes. Ainsi, lors du mouvement de pointage des inputs du cortex visuel primaire se dirigent à travers des voies cortico-corticales vers les aires pariétales (parieto-occipital (PO), pariétale dorso-médiale (PDM) et intra-pariétale médiale (IPM)) pour aboutir à l'aire prémotrice dorsale (PMD). Cette voie est responsable de la

transformation de l'information visuelle concernant la localisation des objets dans l'espace extra-personnel qui permet de guider la main dans la direction désirée. Au cours des mouvements de préhension, les inputs efférents du cortex visuel primaire se dirigent vers la cortex extra-striatal dorsal, l'aire intra-pariétale antérieure (IPA) et l'aire pré-motrice ventrale (PMV). Par contre, cette voie est responsable de la transformation de l'information visuelle en ce qui a trait aux propriétés intrinsèques des objets «la forme et la taille». L'aire PMV est activée lors de l'exécution des actions spécifiques de la main comme par exemple lors des mouvements de saisie utilisant tous les doigts de la main (Krakauer et Ghez 2000). Cette aire est aussi impliquée dans la signalisation de la localisation spatiale de la stimulation visuelle en relation aux segments corporels, ce qui permet de guider le mouvement vers les cibles de l'espace péri-personnel (Fogassi et al. 1996; Graziano et al. 1997).

En ce qui concerne la direction du mouvement, il est connu que la fréquence de décharge des cellules du cortex moteur est maximale lorsque le mouvement est produit dans une direction préférée. Cette synchronisation directionnelle d'une population de neurones est décrite comme une fonction de type cosinus dans laquelle l'activité neurale est considérée comme un vecteur. Des analyses cinématiques indiquent que des changements dans les angles articulaires et dans la position finale du doigt varient en conformité avec la fonction cosinus de la direction du mouvement (Georgopoulos et al. 1982). À la lumière d'une analyse cinématique du mouvement de pointage, Pigeon et al. (2000) ont suggéré que les mouvements de pointage sont le résultat d'une seule commande centrale qui change la configuration du bras de telle façon que la

main puisse bouger dans une direction souhaitée. Cette commande centrale pourrait être constituée par la voie pyramidal (cortico-spinal et cortico-bulbar) qu'innervent directement les motoneurones.

L'anatomie fonctionnelle de la tâche de pointage a été aussi analysée chez l'humain en utilisant la TEP. Des images du FSRc ont été enregistrées pour définir l'activité synaptique locale pendant l'exécution d'un mouvement de pointage en utilisant le bras droit. Des résultats ont démontré une activation dans l'aire M1 controlatérale, l'aire PM, l'aire motrice supplémentaire ventrale (AMSv), le cortex cingulaire, le cortex pariétal supérieur (PS) et le cortex occipital dorsal (Grafton et al. 1996). Une autre étude a analysé l'anatomie neuro-fonctionnelle associée avec le contrôle du mouvement de pointage en utilisant une tâche de Fitts modifiée. Les résultats mettent en évidence l'activation des aires suivantes: sensori-motrice gauche, PM, motrice supplémentaire caudale (AMSc) propre, cingulaire dorsale, cortex occipital dorsal et CP. Avec une augmentation de l'indice de difficulté de la tâche, il y a aussi accroissement du FSRc spécifiquement dans les aires associées à la planification des mouvements complexes. Ces aires incluent : cortex occipital bilatéral, pariétal inférieur, cingulate dorsal gauche, AMSc propre et PMD droite (Winstein et al. 1997).

En conclusion, la production efficace d'une tâche de pointage dépend de l'intégrité des voies ascendantes (sensorielles) et descendantes (motrices) ainsi que d'un fonctionnement correct du cortex pariétal en intégrant la sensation à l'action. Pour la production d'une tâche de pointage en impliquant le tronc le cortex pré-moteur et l'aire pariétale 5 pourrait être impliquées. Le cortex pré-

moteur participerait dans les ajustements posturaux à travers du contrôle de la musculature axiale, tandis que l'aire pariétale 5 synchroniserait la direction du doigt. D'autre part, la principale différence entre l'exécution d'un simple mouvement de pointage et l'exécution d'une tâche séquentielle complexe est l'augmentation du FSRc dans l'AMS. Cette activation de l'AMS lors de la planification et de l'exécution de mouvements complexes est en accord avec les études portant sur les enregistrements neuraux chez le singe (Mushiake et al. 1991; Tanji 1994).

1.4 Mouvement de pointage et dominance cérébrale

Des mouvements de pointage sont aussi utilisés pour identifier certaines commandes neuronales qui pourraient être contrôlées par l'hémisphère dominant. Il y a une grande variété d'études qui démontrent des différences hémisphériques dans l'exécution d'un mouvement en fonction du type de tâche utilisée. La plupart de ces études analysent deux groupes de patients hémiparétiques «droitiers» avec lésions dans l'hémisphère dominant et non dominant respectivement. Les deux groupes de patients utilisent leur bras non-parétique qui est comparé avec le bras du même côté chez les sujets sains. Cependant, la majorité de ces études font référence à l'utilisation de tâches manuelles complexes appelées «tâches de Fitts». L'utilisation de la tâche de Fitts est idéale pour étudier le contrôle moteur ipsilatéral chez des patients ayant des lésions corticales unilatérales puisque la complexité de la tâche peut être systématiquement ajustée et mathématiquement spécifiée.

Paul Fitts en 1954 a introduit la notion que le temps requis pour compléter un mouvement rapide de pointage dépend de la complexité de la tâche (loi de Fitts). La complexité de la tâche ou l'indice de difficulté $\log_2 (2AW)$ augmente en relation avec l'amplitude du mouvement (A) et la largeur de la cible (W). Par exemple :

$$T = a + b \log_2 (2AW) \text{ où } T = \text{Temps du mouvement.}$$

D = Distance de la cible

W = Diamètre de la cible

a et b = constantes définies par la tâche.

Plusieurs auteurs ont bien documenté l'utilisation de cette tâche dans la description d'asymétries cérébrales. Par exemple, Haaland and Harrington (1987) ont décrit les effets de la complexité de la tâche sur la performance motrice chez deux groupes de sujets hémiparétiques. Après avoir changé l'indice de difficulté (en deux niveaux en relation au diamètre de la cible) de la tâche de Fitts, ils ont trouvé une altération de la performance motrice seulement chez les patients avec lésions dans l'hémisphère dominant. Dans une autre étude effectuée pour analyser le contrôle des mouvements réciproques rapides de pointage aussi à différents niveaux de complexité, Winstein et Pohl (1995) ont observé que des sujets hémiparétiques avec lésions dans l'hémisphère gauche requièrent plus de temps pour accomplir un mouvement conforme à la tâche qui alors devient complexe. D'autre part, des auteurs ont remarqué que pour l'exécution adéquate de mouvements réciproques rapides, l'impact du doigt sur la cible est critique et dépend d'une transition efficace entre les phases

du mouvement. Cette transition peut être associée aux aspects temporels du mouvement en suggérant que l'hémisphère gauche est impliqué dans le timing du mouvement réciproque de pointage. Les résultats d'autres études confirment ceux décrits antérieurement (Haaland and Harrington 1994; Giuliani et al. 1997).

Le contrôle hémisphérique des composantes initiales et correctives des mouvements de pointage ont été aussi étudiés (Haaland and Harrington 1989). Des analyses cinématiques réalisées chez des patients avec lésions de l'hémisphère gauche ont démontré un accroissement du temps de réaction avec augmentation de la variabilité du temps total du mouvement. Chez des patients avec lésions de l'hémisphère droit, aucune différence n'a été observée. Des auteurs ont donc conclu que l'hémisphère gauche est primordial dans «la programmation et l'exécution» des mouvements de pointage.

D'autres types d'expériences non liées à la formulation de Fitts ont aussi démontré des asymétries hémisphériques. Wyke (1967) a rapporté que les mouvements alternés répétitifs exécutés par deux groupes de sujets hémiparétiques en utilisant la main ipsilatérale ont été réalisés plus lentement par les patients avec un dommage dans l'hémisphère gauche. Dans une étude sur la coordination œil – bras, Fisk et Goodale (1988) ont démontré que les dommages dans l'hémisphère non-dominant produisent une augmentation significative dans la latence du mouvement. Par contre, les dommages dans l'hémisphère dominant produisent des mouvements de durée prolongée, avec de faibles pics de vitesse, de longues phases de décélération et en plus une diminution dans la précision du mouvement. Ces résultats suggèrent que les patients avec des dommages de l'hémisphère droit ont des déficits dans la

détermination de la position spatiale de la cible. Par contre, les patients avec des lésions de l'hémisphère gauche présentent des déficits dans la sélection du programme moteur adéquat. Haaland and Harrington (1991) ont suggéré que l'hémisphère gauche, en plus de jouer un rôle important dans l'exécution des tâches motrices séquentielles, serait aussi impliqué dans la programmation de certains aspects moteurs pendant l'exécution du mouvement.

Chez les patients apraxiques, la présence d'un hémisphère dominant est plus évidente. Par exemple, les patients apraxiques démontrent une préparation anormale du mouvement lors de l'utilisation de séquences avec différentes postures de la main. Par contre, cette différence n'est pas aussi marquée lorsque les patients apraxiques utilisent des séquences avec postures répétées de la main. En conséquence, chez les sujets apraxiques, les déficits dans la préparation du mouvement qui affectent l'exécution des séquences seraient en relation avec l'utilisation de différentes postures de la main (Haaland and Harrington 1992; 1994).

Dans une étude récente, des différences cinématiques dans l'exécution d'un mouvement d'atteinte avec ou sans la présence d'un objet comme cible ont été analysées chez de sujets sains et des patients hémiparétiques (Wu et al. 2000). Par contre, pour cette étude, les sujets hémiparétiques ont utilisé leur bras parétique. Les résultats ont démontré que la présence d'un objet comme cible produit une amélioration de la performance motrice pour tous le groupes de sujets. Chez des sujets hémiparétiques, des analyses cinématiques ont démontré un temps de mouvement prolongé lors de l'exécution du mouvement sans la présence de l'objet comme cible, des bas pics de vitesse et plusieurs

unités de mouvement. Ces caractéristiques cinématiques sont plus évidentes chez des patients avec lésions de l'hémisphère dominant. Les auteurs ont suggéré que des patients avec lésions de l'hémisphère gauche sont moins aptes à utiliser l'information visuelle et proprioceptive afin d'actualiser et modifier la trajectoire de la main. Ces résultats sont en accord avec l'idée que l'hémisphère gauche est responsable de la programmation motrice et du transfert de l'information externe dans des coordonnées internes.

La présence de déficits dans la performance motrice du bras ipsilatéral à la lésion (non-atteinte) est évidente chez des sujets ayant subi des lésions dans l'hémisphère dominant. Ces déficits sont associés spécifiquement à l'exécution de tâches sensori-motrices complexes qui demandent des processus cognitifs. Il n'y a pas d'études qui démontrent des déficits ipsilatéraux avec l'exécution de tâches sensori-motrices simples où la demande cognitive est minimale. Par contre, un nombre réduit d'études démontre que les deux hémisphères sont d'importance égale quant à certains aspects du mouvement (Haaland et Delaney 1981; Jason 1986). En conclusion, chez les sujets droitiers, selon la complexité de la tâche demandée, l'hémisphère dominant est plus impliqué dans le contrôle du mouvement. L'hémisphère gauche pourrait être associé à la programmation et l'exécution des processus cognitivo-moteurs.

1.5 Le problème de redondance et le contrôle du tronc

La composition multi-articulaire du corps permet de coordonner les articulations de plusieurs façon différentes afin de produire un mouvement en particulier. Ce problème en contrôle moteur est connu comme le problème de

redondance (Bernstein1967). Le problème de redondance provient du fait que chaque articulation a entre un et trois différents axes de rotation ou degrés de liberté. Pour effectuer un mouvement multi-articulaire, le SNC réduit les degrés de liberté par l'activation simultanée d'un groupe de muscles dans une seule unité de mouvement afin d'atteindre un même objectif dans une synergie de mouvement. L'utilisation d'une même synergie pour l'exécution d'un mouvement cyclique complexe répété a démontré que les trajectoires de ce mouvement se ressemblent mais varient d'un cycle à l'autre. Cette observation indique que le système utilise la redondance pour conserver une certaine flexibilité (Bernstein1967).

Lors de la coordination articulaire d'un simple mouvement de pointage chez des sujets sains, Soechting et Lacquaniti (1981) ont démontré qu'il y a des caractéristiques cinématiques invariantes pour effectuer le mouvement. La pente de la vitesse angulaire du coude versus la pente de la vitesse angulaire de l'épaule est constante et indépendante de la localisation de la cible pendant la phase terminale du mouvement. Ces observations ont permis aux auteurs de conclure que le mouvement angulaire du coude est en relation constante avec le mouvement de l'épaule et est indépendante de la vitesse globale du mouvement vers la cible. Au cours de cette expérience, ils ont analysé la relation entre les mouvements du coude et l'épaule (deux degrés de liberté) lors d'une tâche de pointage. Dans une autre expérience, Soechting et Lacquaniti (1982) ont ajouté le mouvement de poignet (un autre degré de liberté) afin d'en analyser la coordination inter-articulaire lors de l'exécution d'un mouvement de préhension. La tâche demandée était de rejoindre et prendre un cylindre

positionné en diverses directions. Les résultats démontrent que le mouvement du poignet n'influence en aucune façon les relations observées antérieurement entre le coude et l'épaule. Par ailleurs, ils n'ont pas observé de corrélation entre la rotation de l'avant-bras et les mouvements d'extension de l'épaule ou du coude. Des auteurs ont conclu qu'il devait exister un couplage fonctionnel entre les mouvements du coude et l'épaule, alors que le mouvement du poignet est découplé des deux autres. Ce découplage peut être expliqué par la rotation de l'avant-bras qui utilise des plans de mouvements perpendiculaires par rapport à ceux du coude et de l'épaule. La présence du couplage fonctionnel entre les mouvements de l'épaule et du coude réduit la complexité du contrôle de la coordination inter-articulaire et donne une solution partielle au problème de la redondance.

Chez des sujets hémiparétiques la coordination inter-articulaire au niveau du bras atteint a aussi été analysée. Levin (1996) a étudié la coordination inter-articulaire lors de l'atteinte de différentes cibles au cours de l'exécution d'un mouvement de pointage. Les résultats ont démontré une diminution de l'amplitude du mouvement avec le temps d'exécution prolongé et une augmentation dans le nombre d'unités de mouvement lorsque les patients ont utilisé le bras parétique. Les trajectoires de mouvement générées ont été irrégulières et caractérisées par une grande segmentation. Par contre, les patients hémiparétiques ont pu atteindre la cible, malgré leur déficit. Cette réussite dans l'atteinte de la cible tend à indiquer que la capacité à planifier le mouvement n'est pas affectée. D'autre part, la coordination inter-articulaire est altérée ce qui suggère que les patients hémiparétiques ont plutôt des déficits au

niveau de l'exécution du mouvement. Ces déficits pourraient se caractériser par des difficultés à spécifier les mouvements articulaires requis pour produire la trajectoire souhaitée.

Le déplacement du tronc peut être aussi impliqué dans le mouvement de pointage. Des expériences sur la coordination tronc-bras où des sujets n'avaient pas d'instructions précises concernant les parties du corps à utiliser, démontrent que le tronc participe dans le mouvement seulement lorsque la cible est placée au-delà de la longueur du bras. Les mouvements du tronc pourraient s'intégrer parfaitement à ceux du bras et la trajectoire du bras resterait constamment régulière pendant tout le mouvement. Cette observation suggère que le mouvement du tronc contribue au transport de la main vers la cible lors l'exécution d'un mouvement de pointage en dehors de l'espace de travail (Kaminski et al.1995). En résumé, l'addition d'un degré de liberté (le tronc) n'a pas eu d'effet sur la configuration des articulations et segments utilisés pour atteindre la cible. Ceci suggère que le mouvement tronc-bras est partie intégrante d'une seule et même synergie.

Dans une autre série d'études, on a demandé à des sujets de faire des mouvements de pointage en-dedans de l'espace de travail en impliquant le tronc. Ma et Feldman (1995) ont observé que le tronc initie et termine le mouvement. Le fait que seul le tronc bouge au début du mouvement quelque milli-secondes avant le bras suggère que des articulations intermédiaires entre le tronc et le doigt compensent pour les mouvements du tronc afin de maintenir le doigt immobile dans la position de départ. Les auteurs ont conclu qu'il existe deux synergies de contrôle pour ce type de mouvement : une synergie

contrôlant le mouvement du tronc sans changer la position du doigt au début du mouvement et une autre produisant la coordination inter-articulaire en dirigeant le doigt vers la cible.

Une récente approche de Pigeon et al. (2000) a suggéré une superposition des unités indépendantes (synergies) lors de l'exécution du mouvement de pointage impliquant le tronc. Lors de la coordination tronc-bras, la synergie de mouvement du bras se superpose à la synergie du mouvement du tronc. Cette superposition est possible grâce à des modifications adéquates dans des angles articulaires du coude et de l'épaule.

Archambault et al.(1999) ont analysé un mouvement de pointage impliquant le tronc chez des sujets sains et hémiparétiques afin d'étudier les altérations dans les séquences de recrutement des différents degrés de liberté entre le tronc et le bras. Chez des sujets sains, leurs résultats ont démontré qu'il y avait un modèle stéréotypé de recrutement et dé-recrutement des segments du corps (tronc-bras) lors l'exécution du mouvement. Par contre, chez les sujets hémiparétiques bougeant avec le bras atteint, on dénote une difficulté dans la stabilisation de la séquence temporelle du déroulement du mouvement entre le tronc et le bras. Certains auteurs ont conclu que le recrutement et le dé-recrutement de la séquence temporelle du mouvement tronc-bras sont altérés chez ces patients. Cette altération pourrait se présenter par déficits dans l'utilisation de la synergie compensatoire puisque les sujets hémiparétiques sont toutefois capables d'approcher leur main à la cible en utilisant quelques unités de mouvement.

En conclusion, le déplacement du tronc est associé à la synergie du membre supérieur pour l'atteinte d'un objet situé soit à la limite ou en dehors de l'espace de travail du bras. L'inclusion du mouvement du tronc dans l'exécution d'un mouvement de pointage ne change pas la trajectoire de la main vers la cible. Deux types de synergies sont impliquées dans le mouvement : une synergie compensatoire produite par le recrutement du degré de liberté additionnel du tronc et une autre synergie de transport de la main vers la cible. La superposition des synergies suit un ordre temporel essentiel dans la composition du mouvement. Les altérations dans les synergies du tronc, du bras ou pendant leur coordination, peuvent changer la direction de la main en produisant des erreurs dans l'exécution de la tâche. Ce problème est révélé lors d'une analyse de la coordination bras - tronc chez les patients ayant subi un ACV.

CHAPITRE II

2.1 Problématique

La révision de la littérature a permis de mettre en évidence l'influence de l'hémisphère dominant sur la performance motrice pour l'exécution d'une variété de tâches manuelles. L'hémisphère gauche joue un rôle important (plus que le droit) dans l'intégration sensori-motrice et le timing des mouvements séquentiels comme l'indiquent les études précédentes chez les sujets sains (Kim et al.1993; Chen et al.1997), chez les sujets hémiparétiques (Wyke 1967; Haaland and Harrington 1989, 1996b; Winstein and Pohl 1995), et chez les patients avec callosotomie (Geffen et al. 1994). La plupart de ces études analysent le contrôle des aspects temporels d'une séquence de mouvement où la musculature distale est impliquée. Cependant, aucune étude par rapport à la dominance cérébrale a analysé les aspects temporels du mouvement en impliquant la musculature proximale et distale. Par contre, la coordination temporelle entre la musculature proximale et distale a été analysée cinématiquement dans une série d'études chez des sujets sains (Ma et Feldman 1995; Pigeon et Feldman 1998). Spécifiquement, la coordination temporelle tronc-bras lors de l'exécution d'un mouvement de pointage dans l'espace péri-personnel a été analysée. Dans ces études, les auteurs ont remarqué que le tronc commence le mouvement au même temps ou avant que le bras et que le mouvement du tronc se continue après que le doigt arrive à la cible. Ce modèle stéréotypé de recrutement (début) et dé-recrutement (fin) des segments

corporels (tronc-bras) indique l'importance de l'organisation temporelle dans la coordination inter-segmentaire pour le contrôle du mouvement. Dans une autre étude utilisant la même tâche, les sujets hémiparétiques ayant une lésion dans l'hémisphère dominant ont présenté des déficits dans l'exécution du mouvement effectué avec le bras parétique. Ces déficits ont été caractérisés par une grande variabilité dans la trajectoire de la main, par une durée du mouvement prolongée et surtout, par des altérations dans la coordination temporelle au début et à la fin du mouvement. En conséquence, le modèle de recrutement et dé-recrutement tronc-bras chez les sujets hémiparétiques avec lésions dans l'hémisphère dominant est altéré en démontrant une variabilité importante et un patron de mouvement inconstant (Archambault et al. 1999). En considérant ces résultats, nous avons émis l'hypothèse que des sujets avec lésions dans l'hémisphère dominant présenteront des déficits plus marqués dans la coordination temporelle tronc-bras que des sujets avec lésions dans l'hémisphère non-dominant. Donc l'objectif de cette étude est de déterminer quel hémisphère cérébral joue un rôle différentiel dans la coordination temporelle entre la musculature proximale et distale chez deux groupes de sujets hémiparétiques avec lésions dans l'hémisphère dominant ou non-dominant. Des sujets hémiparétiques ont utilisé le bras non-parétique pour exécuter un mouvement de pointage à deux cibles (ipsilatéral et controlatérale) situés dans l'espace de travail péri-personnel. Deux conditions de mouvement ont été effectués (en phase et hors phase) en combinaison avec les deux types de cibles pour analyser la coordination tronc-bras à différents niveaux de difficulté (simple et complexe). Un mouvement de coordination simple

impliquerait la condition en phase vers la cible ipsilatérale. Par contre, un mouvement de coordination complexe serait constitué par la condition hors phase vers la cible controlatérale. Des résultats obtenus ont été comparés avec ceux de sujets sains qui ont utilisé le même bras que les sujets hémiparétiques.

2.2 Article

Hemispheric specialization in the temporal coordination of arm and trunk movements during pointing in stroke patients

Danilo Y. Esparza^{1,2}, Philippe S. Archambault^{1,2}, Carolee J. Winstein⁴, Mindy F. Levin¹⁻³

¹Neurological Science Research Centre, Department of Physiology, Université de Montréal; ²Centre for Interdisciplinary Research in Rehabilitation, Rehabilitation Institute of Montreal, ³School of Rehabilitation, Université de Montréal; ⁴University of Southern California

Address for correspondence:

Mindy F. Levin, PhD
Director, site IRM, CRIR,
6300 Darlington
Montreal, Quebec
H3S 2J4
Tel: 514-340-2780
FAX: 514-340-2154
Email: levinm@poste.umontreal.ca

2.2.1 Abstract

During pointing movements involving trunk displacement, healthy subjects perform stereotypically, selecting a strategy where the movement is initiated with either the hand or trunk, and where the trunk continues after the end of the hand movement. Such temporal co-ordination was not preserved in patients with left-hemispheric brain lesions reaching with either their dominant paretic or with their non-dominant non-paretic arm. This co-ordination deficit may be associated in part with the presence of a lesion in the dominant left hemisphere. If so, then no deficit should be observed in patients with stroke-related damage in their non-dominant right hemisphere moving with their ipsilesional arm. To verify this, 21 right-hand dominant adults (7 who had had a stroke in the right hemisphere, 7 who had had a stroke in the left hemisphere and 7 healthy subjects) pointed to two targets located on a table in front of them in the ipsilateral and contralateral workspace. Pointing was done under three movement conditions: while not moving the trunk, while bending the trunk forward and while bending the trunk backwards. The experiment was repeated with the non-paretic arm for patients with stroke and for right and left arms of healthy subjects. Kinematic data were recorded (Optotrak). Results showed that, compared to healthy subjects, arm-trunk timing was disrupted in patients with stroke for some conditions. As in patients with lesions in the dominant hemisphere, arm-trunk timing in those with lesions in the non-dominant hemisphere was equally more variable than movements in healthy subjects. However, patients with dominant hemisphere lesions used significantly *less* trunk displacement than those with non-dominant hemisphere lesions to

accomplish the task. The deficit in trunk displacement was not due to problems of trunk control or sitting balance since, in control experiments, all subjects were able to move the trunk the required distance, with and without the added weight of the limb. Results support the hypothesis that the temporal co-ordination of trunk and arm recruitment during pointing movements is mediated bilaterally by each hemisphere. However the difference in the range of trunk displacement between patients with left and right brain lesions suggests that the left (dominant) hemisphere plays a greater role than the right in the control of movements involving complex co-ordination between the arm and trunk.

Key words : Stroke – cerebral dominance – timing – multi-joint coordination - lateralized control - hemispheric specialization - motor control

2.2.2 Introduction

Studies of cerebral dominance have emphasised the greater role of the left than the right hemisphere in the control of specific components of a variety of motor tasks performed by the arm and hand. The left hemisphere is thought to play a dominant role in the sensorimotor integration and timing of movement sequences as shown by behavioral (Kimura 1982; Tzeng and Wang 1984) and imaging studies (Kim et al. 1993; Chen et al. 1997) in healthy subjects, as well as in studies of subjects with stroke (Wyke 1967; Haaland and Harrington 1989; Winstein and Pohl 1995; Sunderland et al. 1999) and corpus callosotomy (Geffen et al. 1994). For example, the left hemisphere plays a preferential role in the processing of the ballistic component of a movement during rapid aiming tasks (Wyke 1967; Haaland et al. 1987; Haaland and Harrington 1989; 1994; Robinson et al. 1990). In addition, patients with cerebro-vascular accident (CVA) in the left hemisphere were more impaired than those with right-hemispheric lesions in the scheduling or timing of a series of actions within a sequence when moving with the ipsilateral, non-paretic arm (Kimura 1977; 1982; Tzeng and Wang 1984; Harrington and Haaland 1991, 1992; Winstein and Pohl 1995). The greater importance of the left hemisphere in the control of sequential movements involving the distal musculature, and specifically the left (dominant) primary motor cortex (M1), is supported by fMRI studies showing substantially more ipsilateral M1 activation with left hand movements than right during sequential movements involving finger-to-thumb opposition (Kim et al. 1993). Taken together, these results have led to the suggestion that the left hemisphere

is important for the processing of temporal information (Winstein and Pohl 1995; Chen et al. 1997).

Most studies of cerebral dominance have focused on the control of temporal aspects of movement components within a sequence performed mainly with the distal musculature. Since natural reaching movements almost always includes postural adjustments involving the trunk, it is fitting to study whether lateralised brain damage would cause similar disruptions in the temporal control of movements involving both distal and proximal musculature. The temporal co-ordination of reaching movements involving the trunk has been addressed in a series of studies in healthy subjects (Ma and Feldman 1995; Pigeon and Feldman 1998). In these studies, in which the trunk is deliberately recruited during pointing to targets placed within arm's reach, healthy subjects typically start moving the trunk at the same time or prior to the arm at the beginning of the reach, while upon reaching the target, the trunk movement continues for several tens of milliseconds after the arm movement has stopped. A smooth hand trajectory is achieved by neutralising the influence of the trunk on the hand movement by compensatory rotations of the arm joint angles in the opposite direction to the trunk movement throughout the reach (Pigeon and Feldman 1998).

Using a similar paradigm, we have shown that patients with left-hemispheric stroke-related brain damage have more variable hand trajectories, longer movement times and disrupted arm-trunk temporal co-ordination at movement onset and offset when moving with the right, paretic arm (Archambault et al. 1999). Based on these results and concepts of lateral

dominance, we hypothesized that individuals with stroke in the dominant (left) hemisphere would have more temporal co-ordination deficits than those with non-dominant right-hemispheric lesions for movements involving both distal and proximal musculature. Thus, the purpose of this study was to determine whether cerebral dominance plays a differential role in the temporal co-ordination of arm and trunk movements during pointing movements to targets within the reach of the arm. Movements made with the ipsilesional arm in right-handed patients with stroke-related damage in the right, non-dominant hemisphere were compared to those made by patients with lesions in the left, dominant hemisphere as well as with both arms in right-handed healthy individuals. Preliminary data have appeared in abstract form (Esparza et al. 2001).

2.2.3 Materials and methods

Subjects

Three groups of right-hand dominant adults participated in this study: One group of neurologically healthy subjects, and two groups of patients with CVA. The control group (mean \pm sd = 52 \pm 18 years) was composed of seven healthy individuals (four women and three men), with no neurological disorders or physical deficits involving the arms or trunk. One CVA group (n = 7) had lesions in the dominant hemisphere (47 \pm 14 years) and the other (n = 7) had lesions in the non-dominant hemisphere (50 \pm 21 years). All participants were informed of the experimental procedures and signed a consent form approved by the hospital Ethics Committee. Individuals with CVA met the following inclusion criteria: 1) they had sustained a single ictal event, at least 6 months

previously; 2) they had no other neurological disorders; 3) they were able to understand instructions (no receptive aphasia); 4) they had no pain or orthopaedic problems in the ipsilesional arm; 5) they were ambulatory and had scores on the Berg Balance Scale (Berg et al. 1989; 1992) greater than 40 out of a maximum score of 54 indicating good balance and 6) they were able to reach forward with the affected arm (greater than 25 out of 66 on the arm and hand section of the Fugl-Meyer Stroke Assessment Scale; Fugl-Meyer et al. 1975). Patients with lesions in the occipital lobe, cerebellum or brain stem were excluded from the study. Patients with other neurological, neuromuscular or orthopaedic disorders or major visual attention problems, major perceptual or cognitive deficits, neglect, apraxia or shoulder pain in the arm that may have interfered with task accomplishment were excluded. All the patients with CVA had followed the usual rehabilitation procedures associated with their condition and had been discharged from active therapy. Medical information was obtained by chart review of appropriate clinical tests done at the time of hospital discharge. Demographic data are presented in Table 1.

Table 1. Demographic data and clinical scores for hemiparetic subjects (*M* male, *F* female, *MCA* middle cerebral artery)

S	Age (yrs)	Sex	Time since injury (mo)	Location and type of lesion	Fugl-Meyer Score (66)	Berg Balance Scale (56)
<i>Right hemiparetic</i>						
1	40	M	63	Temporal lobe and basal ganglia lesions	27	56
2	22	M	78	MCA, temporo-parietal and internal capsule lesions	29	53
3	56	F	115	Massive hemorrhage	50	54
4	53	F	32	Embolism, MCA, basal ganglia lesion	55	52
5	42	M	37	Thalamus, internal capsule and basal ganglia lesions	57	41
6	67	M	120	Parietal lobe lesion	61	50
7	52	M	34	Central infracerebral and posterior internal capsule lesions	61	52
<i>x±</i>	47.4					
<i>s</i>	± 14.3					
<i>d</i>						
<i>Left hemiparetic</i>						
1	57	M	49	MCA, internal capsule lesion	30	50
2	59	F	18	MCA, fronto-parietal lesion	35	52
3	67	M	13	Frontal lobe and sub-cortical lesions	58	45
4	34	F	18	MCA, basal ganglia lesion	60	56
5	21	M	13	Sub-arachnoid hemorrhage	66	55
6	35	F	19	Sub-arachnoid hemorrhage	66	56
7	78	F	15	Putamen and basal ganglia lesions	66	56
<i>x±</i>	50.1					
<i>s</i>	± 20.5					
<i>d</i>						

Experimental procedure

Subjects sat on a bench with no back support in front of a 180 cm by 120 cm plexiglass table placed at a height of 80 cm from the floor. Each was

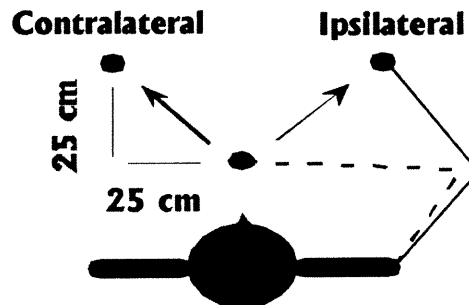
seated in a semicircular cut-out section of the table so that with their hand in the initial target position, the elbow was flexed to 60-90° and their shoulder was in approximately 70° flexion and abduction. The initial target was located 20 cm from the sternum directly in front of the subject. Two final targets (ipsilateral, IT; and contralateral, CT) were placed 35 cm away, at a 45° angle to either side of the initial position. Targets were indicated by 4 mm light-emitting diodes embedded in the surface of the table.

Healthy subjects performed pointing movements with their right and left arms and individuals with stroke with their non-paretic arms to each of the two targets under three movement conditions: 1) while not bending the trunk (control, Fig. 1A); 2) while bending the trunk forward (in-phase condition, Fig. 1B); 3) while bending the trunk backward (out-of-phase condition, Fig. 1C). On an initial auditory 'ready' signal, participants lifted the arm and hand 3-4 cm from the surface of the table. After a random delay of 1-2 s, a second tone signalled the start of the movement. Movements were made without touching the table and with full vision. Participants were instructed to begin moving as soon as they heard the second tone and to make movements at a comfortable speed and without correction. Movement accuracy was not stressed. For trials with trunk movement, participants were instructed to produce a substantial trunk excursion (about 15-20 cm forward or backward) in the sagittal plane together with the arm movement. Trials in which sagittal trunk motion was less than 3 cm or trunk rotations out of the sagittal plane of more than approximately 5° occurred, as estimated by visual monitoring of the movements throughout the experiment, were repeated. These accounted for less than 5% of trials.

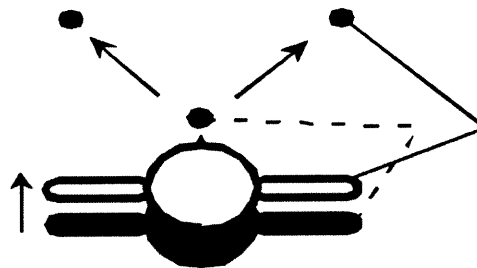
Blocks of ten trials for each of the 4 conditions (in-phase IT; out-of-phase IT; in-phase CT; out-of-phase CT) were recorded with rest periods of 2-5 min between blocks. Each block was preceded by ten control trials, in which subjects pointed to the same target but without trunk motion. The order of conditions was randomised.

Three control experiments were done to determine if patients with stroke had trunk movement or balance deficits when the trunk moved alone, when it moved with the added weight of the raised arm or when it moved while the subject was required to move the raised arm. In the first experiment, subjects were seated in the same configuration as described above for the co-ordination experiment but at the sound of the tone, they leaned the trunk either forward or backward, with the arms hanging loosely by their sides. In a second control, subjects placed their arm so that their hand was held 20 cm in front of the sternum and they performed forward or backward trunk displacements. In a third control, the second control experiment was repeated while subjects moved their hand sagittally at the same time as the trunk moved. For the third control experiment, neither arm movement distance nor accuracy was stressed. Eight trials were recorded for each control condition.

A. Control



B. In-phase condition



C. Out-of-phase condition

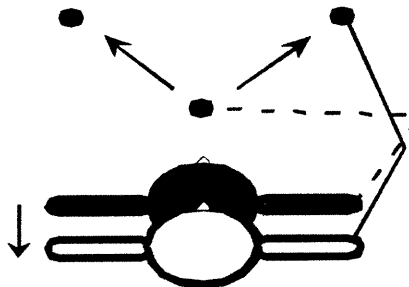


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental design. Subjects pointed to targets located in the ipsilateral or contralateral workspace while not moving the trunk (A), or while moving the trunk in the same (B, in-phase) or in the opposite direction (C, out-of-phase) of the hand movement.

Data Analysis

Three-dimensional kinematic data were collected (sampling rate 100 Hz) using an Optotrak Motion Analysis system (model 3010, Northern Digital, Ontario). Motion of the arm and trunk was recorded from 6 infra-red emitting diodes (IREDS) positioned on the tip of the index finger, wrist (styloid process), elbow (lateral epicondyle), both shoulders (acromion) and mid-sternum. Position data were rotated and translated using geometrical transformations, to a system of co-ordinates in the plane of the table with the origin at the position of the initial target. From the filtered (low-pass, cut-off 20 Hz) position data, arm and trunk velocity (three dimensional and tangential) were calculated by numerical differentiation. Arm and trunk movement times were defined as the times between the start and end of the index finger and sternal marker movements respectively. Start and end times for each trial were defined as the times at which the tangential velocity rose above or fell and remained below, respectively, 10% of the peak tangential velocity of the respective marker (Fig. 2). Movement times were used to determine the delay between arm and trunk recruitment for reaches for each target and condition. The absolute differences in time between the arm and trunk motion at both movement start and end were used to determine which segment (arm or trunk) began to move first at the beginning of the reach or stopped moving first at the end of the reach. Simultaneous movements were defined as differences that did not exceed ± 20 ms. The average time delay between the arm and trunk movements as well as the variability (standard deviation) were computed for each subject for each

block of trials. Trunk displacement was measured as the distance, in mm, moved by the sternal marker in the sagittal plane between movement beginning and end.

Except for log-transformed data for the comparison of response variability between groups, parameters were compared across aiming conditions and between groups using non-parametric statistics. This was done because of the small number of subjects per group and the likelihood that the variances of the means between groups of subjects with and without neurological deficits would not be homogeneous (Kruskal-Wallis ANOVA, Mann-Whitney U test). Significance levels of $p < 0.05$ were used for all tests.

2.2.4 Results

Kinematics

Healthy individuals and participants with stroke made smooth arm and trunk trajectories characterised by bell-shaped velocity profiles with one predominant peak (Fig. 2). In healthy subjects, arm tangential velocity profiles were highly reproducible for the same test conditions. Mean peak velocities of arm and trunk movement ranged from 1044 to 1544 mm/s and 261 to 350 mm/s respectively with the fastest speeds occurring for in-phase movements. The repeated measures ANOVA on arm peak velocity showed a significant effect of both target location ($F_{1,3} = 14.51$; $p < 0.001$) and trunk involvement ($F_{2,10} = 6.62$; $p < 0.02$). There were no differences, however, between movements of right and left arms in healthy subjects for any of the measured

parameters (arm peak velocity, trunk displacement, movement onset/offset delay and variability of delay).

Mean arm peak velocities were significantly slower in both groups of CVA patients compared to the healthy subjects (repeated measures ANOVA, equal variances confirmed (Levene's test) $F_{1,3} = 4.074$, $p < 0.01$). These ranged from 674 to 1012 mm/s with stroke patients also showing an effect of trunk involvement (condition) but not of arm. On the other hand, mean trunk peak velocity in patients with stroke did not differ from healthy subjects (223 to 305 mm/s).

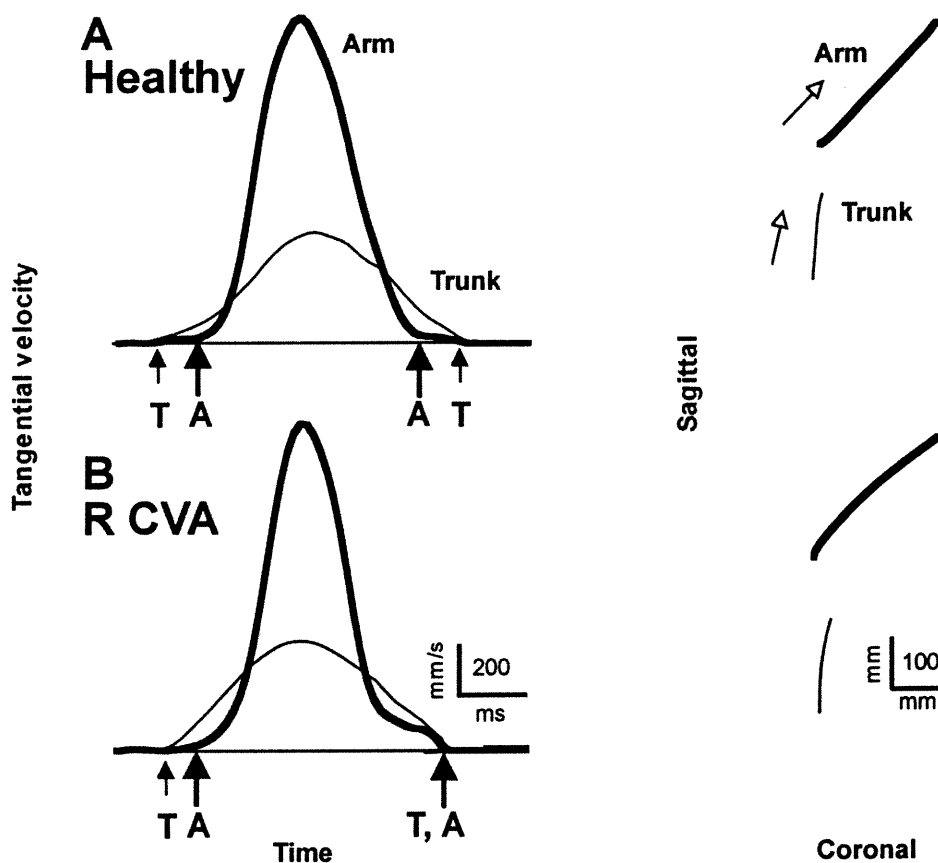


Fig 2. Examples of tangential velocity profiles (left panel) and trajectories (right panel) of the arm and trunk from a representative trial in one healthy (right arm, A) and one subject with a right CVA (non-paretic right arm, B). Data are from trials in which subjects pointed to the ipsilateral target while moving the trunk forward, in-phase with the arm movement. The delay between arm and trunk recruitment was calculated as the time between the onset of trunk (thin arrow, T) and the onset of arm (thick arrow, A) movement. The trunk usually started moving before the arm at the onset of movement and continued moving after the arm had stopped at the end of movement (see Fig. 4). In the example shown in B however, the arm and trunk stopped moving nearly simultaneously at the end of movement.

Trunk displacement

Patients with left-hemispheric CVA used significantly less trunk displacement than right CVA and healthy subjects for all conditions (Fig. 3; healthy versus left-CVA: U-tests, $p < 0.05 - 0.005$). Trunk displacement in patients with left-CVA ranged from 56 to 152 mm for the in-phase conditions and from 46 to 143 mm for out-of-phase movements compared to 78 to 228 mm for all movements in right CVA and healthy subjects.

In control experiments, all subjects were able to move their trunk alone or the trunk and arm together more than 150 mm either in the forward or backward leaning direction. Mean forward displacements for the trunk alone condition were 251.3 ± 31.2 mm for healthy subjects, 283.4 ± 47.5 mm for patients with right-hemispheric lesions and 190.6 ± 80.9 cm for those with left-hemispheric lesions. Adding the weight of the arm had no effect on the ability of patients to control trunk displacement (e.g. mean forward trunk displacement with the arm was 256.6 ± 51.3 mm for patients with right-CVA and 209.3 ± 32.9 mm for left-CVA).

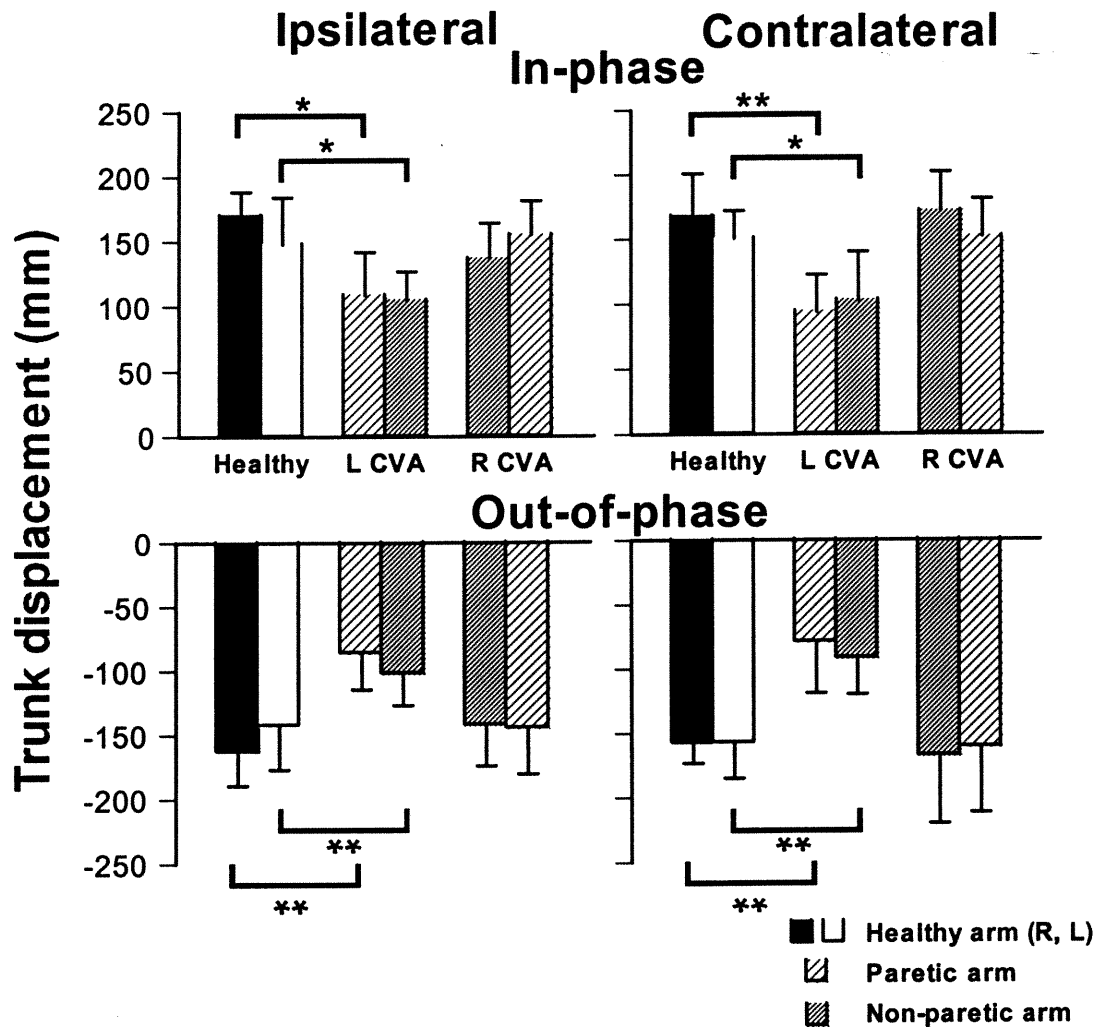


Fig. 3. Amplitudes of trunk displacement for conditions in which the trunk moved in-phase (top) and out-of-phase (bottom) with the arm. Data from conditions in which subjects moved right and left arms are shown for each group. Data from the hemiparetic arm of patients with stroke are shown for comparison. Note the similar values for trunk displacement when subjects with stroke pointed with their paretic or non-paretic arm. Significant differences between groups are indicated by asterisks (Mann-Whitney U test, * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$).

Arm-trunk delays

The mean delays between trunk and arm motion at the start and end of movement are shown in Fig. 4. Horizontal bars to the left of the centreline indicate that the movement was initiated with the trunk. Bars extending to the right of centre indicate that at the end of movement, the trunk stopped moving after the arm. Comparisons were made for left arms between left-CVA and healthy subjects as well as for right arms between right-CVA and healthy subjects.

For in-phase movements, at movement start (Fig. 4, left top panels), all groups started the movement with the trunk for reaches to both targets while patients with right-CVA had significantly longer delays between trunk and arm movements than left-CVA ($t = -3.78, p < 0.01$) and healthy subjects ($t = -2.7, p < 0.05$). At movement offset (right panel), the trunk continued to move after the end of arm movement in all subjects with the exception that patients with right-CVA tended to stop moving the arm and trunk together when pointing to the ipsilateral target during in-phase trunk movement.

For out-of-phase movements, on average, all groups showed similar trunk-arm delay patterns for all conditions except that patients with right-CVA tended to have longer delays at the end of movement.

Trunk starts before arm

Trunk ends after arm

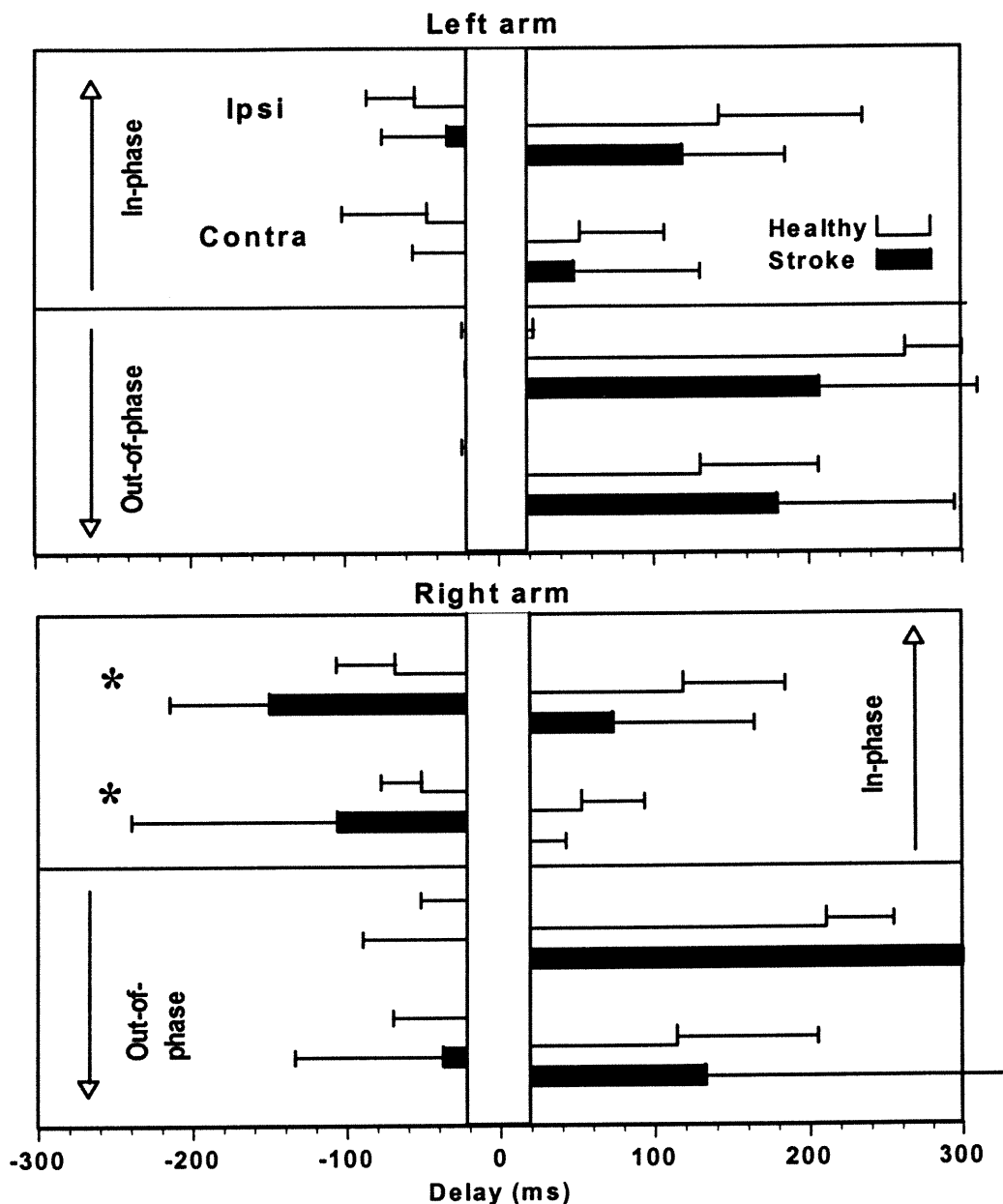


Fig. 4. Mean and standard deviations of arm-trunk delays at the beginning (left) and end (right) of movement for pointing made with both arms in healthy subjects (open bars) and for non-paretic arms in stroke patients (filled bars). Data from all conditions are shown. The only significant group difference ($p < 0.05$) occurred for reaches made to the ipsilateral target with the right arm while the trunk moved forward, in-phase with the arm movement.

The most marked difference between groups occurred with respect to the variability of arm-trunk delays that was significantly higher in both stroke groups compared to the healthy group ($p < 0.05$ for onset and offset comparisons). Figure 5 shows arm-trunk delays for the start (A) and end (B) of movements in individual trials for each subject for in-phase trunk movements when pointing to the ipsilateral target. Circles indicating individual trials appear below the zero line when trunk movement precedes arm displacement at the start of movement and above the line when the trunk movement stops after arm displacement at the end of movement. For healthy subjects, at movement start and end, the data were consistent with this pattern. However, patients with stroke had more variable behavior as shown by a wider dispersion of arm-trunk delays with values often dispersed across the zero line. For example, all healthy subjects initiated the movement with the trunk first and there was a strong similarity in patterns for movements with either arm. Thus, once a pattern was chosen, the same pattern was used for subsequent trials in the same condition. In contrast, patients with CVA showed less stereotyped behavior so that in the same movement condition, some trials could be initiated by the trunk and others by the arm. This inconsistency was responsible for the averaged arm-trunk delay being close to zero in many cases.

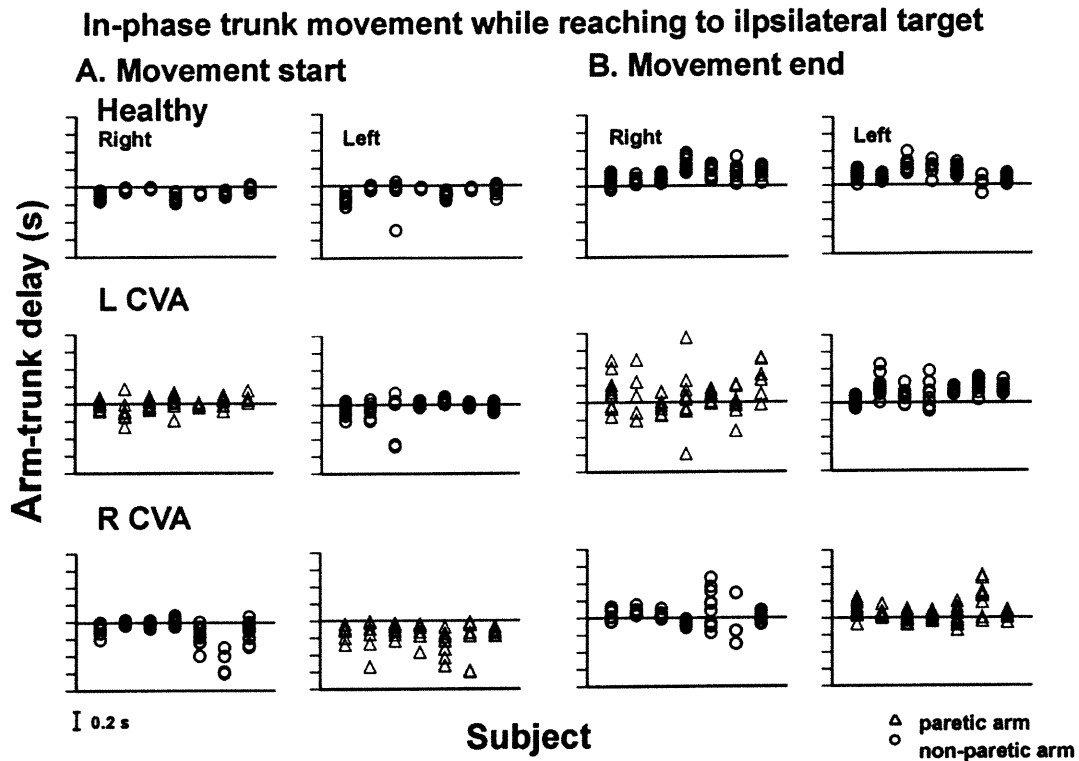


Fig. 5. Individual arm-trunk delays at movement start (A) and end (B) for pointing to the ipsilateral target during in-phase trunk displacement for all subjects. Data from right and left arms for each subject are shown. Circles, right and left arms of healthy subjects and non-paretic arms of CVA patients; triangles, paretic arms of CVA patients.

The variability in arm-trunk delays for all conditions is summarised in Fig. 6. Data were log transformed to homogenise the variance in order to perform statistical comparisons between groups. The variability at the beginning and end of movement in healthy subjects ranged from 41 to 246% of the mean (overall mean for all conditions = 120.4 ± 70.1 %) with the highest variabilities occurring for out-of-phase trunk movements when pointing to the contralateral target. In contrast, variabilities in subjects with CVA were consistently higher for all conditions, ranging from 84 to 502% (mean 222.2 ± 121.9 %).

For arm-trunk delay variability at the start of movement, a repeated-measures 2-factor (group x condition) ANOVA was used on the log-transformed data. This revealed a significant effect of group ($p < 0.007$) and of condition ($p < 0.001$) but there was no group-by-condition interaction. Since there were no differences between overall mean variabilities for patients with right- or left-CVA, we pooled data from both groups of CVA patients together and contrasted the results from pooled data from movements made by both arms of healthy controls. This analysis revealed a significant increase in the variability of arm-trunk timing in both CVA groups compared to healthy subjects. For the arm-trunk delay variability at the end of movement, there was only a significant difference between conditions ($p < 0.0001$) but not for group or group-by-condition interaction.

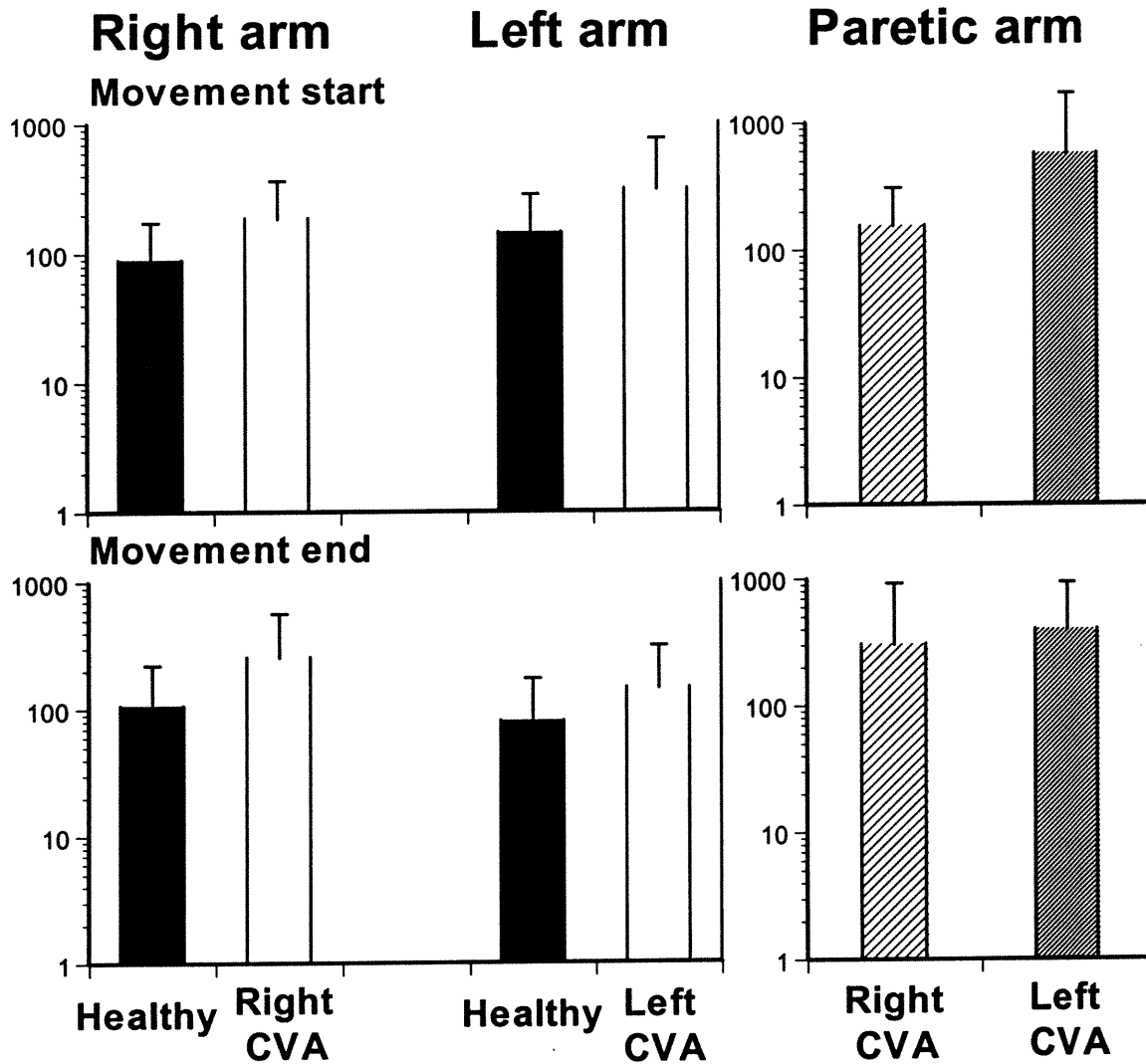


Fig. 6. Group mean (standard deviation) arm-trunk delays for healthy (filled bars) and non-paretic arms of CVA (open bars) subjects plotted on logarithmic scales. Data from trunk-movement conditions and targets are pooled and expressed for movement start (top) and end (bottom). Data from movements made with the paretic arms are shown for comparison (right panels).

2.2.5 Discussion

We used kinematic analysis to investigate the control of the timing of recruitment of different body segments during a pointing task involving deliberate movement of the trunk. Our analysis revealed significant differences between the performance of the arms of healthy subjects and both the ipsilateral, non-paretic arms of patients with damage due to stroke in the left (dominant) or right (non-dominant) hemisphere. These findings are consistent with those of previous studies reporting significant differences in motor behavior in the supposedly non-affected side of the body ipsilateral to the cerebral damage. In addition to previous reports of increased stretch reflex excitability (Thilmann et al. 1990) and differences in motor behavior such as increased movement errors during pointing (Haaland and Harrington 1989; Winstein and Pohl 1995; Velicki et al. 2000), our findings describe specific differences in timing and variability during a task requiring the complex co-ordination of arm and trunk movements. This implies that even isolated, unilateral hemispheric lesions affect motor control on both sides of the body, a finding that has important implications for the control of movements involving co-ordinated bilateral activity.

Co-ordination deficits for arm-trunk movements of the non-paretic arm

The lack of differences between individuals with right- and left-hemispheric lesions does not suggest a specialised role for either hemisphere in the control of movement timing and co-ordination involving both distal and

proximal body segments. This is in contrast to previous studies suggesting a preferential role of the left (dominant) hemisphere in the timing of complex tasks (Rao et al. 1997) and in the execution of movements with a high index of difficulty (Haaland and Harrington 1994; Winstein and Pohl 1995; Winstein et al. 1997). Most of these previous studies investigated the sequential ordering of motor sequences performed by the distal musculature (arm and hand; Harrington and Haaland 1990; 1992) rather than the distal and proximal musculature and the timing of components within sequences as was investigated here. For tasks performed with the distal musculature, more marked differences in timing have been noted in subjects with left- compared to right-hemispheric lesions (Haaland and Harrington 1989; Winstein and Pohl 1995). The left hemisphere is also thought to play a greater role than the right in movement timing when more than one task is strung together such as in sequential movements or tapping. The interpretation of a greater role of the left hemisphere is based on the results of movement analysis and is supported by physiological evidence that timing mechanisms may be an emergent property of the left cerebral cortex, basal ganglia and cerebellar interactions (Kimura, 1982; Keele and Ivry 1990; Shima and Tanji 1998).

Differences in trunk recruitment between subjects with right- and left-hemispheric stroke

Subjects with left-CVA pointing with either arm used significantly less trunk movement than right-CVA or healthy subjects for each pointing condition. This finding may suggest that patients with left- hemispheric lesions have

poorer trunk control than those with lesions in the non-dominant hemisphere. However, the findings that all patients had at least 'good' trunk control according to the clinical assessment scale and also had the ability to displace the trunk at least as far in the forward and backward directions as did healthy subjects, suggest that the smaller trunk displacements were not due to differences due to lateralized trunk control. Indeed, there is ample evidence that the control of the trunk may be mediated bilaterally from both hemispheres. Anatomical studies have shown that trunk musculature is controlled bilaterally through crossed and uncrossed fibres of the ventral cortico-spinal tract (Liu and Chambers 1964; Kuypers 1981), and ipsilaterally through the reticulo-spinal tracts (Peterson et al. 1979). Also in support of bilateral cortical influences are the results of studies using unilateral transcranial magnetic stimulation in humans showing bilateral activation of trunk muscles at rest or during simultaneous voluntary contractions (Carr et al. 1994; Ferbert et al. 1992).

If trunk movements are controlled bilaterally from both hemispheres, lesions in either hemisphere would induce similar deficits in trunk control. Such trunk involvement could explain the increased variability of the timing between arm and trunk movements in both patient groups pointing with either arm compared to the age-matched healthy group (Fig. 6). However, our group of patients with left-hemispheric lesions had a significantly lower amplitude of trunk movement. Although other factors such as muscle weakness (Colebatch et al. 1986) or deficits in the control of muscle co-contraction (Hammond et al. 1988; Levin and Dimov 1997) may lead to a decreased range of motion, there is no

reason to believe that the control of these factors should be lateralised (i.e. that there would be a difference between patients with left- and right-hemispheric lesions). It is more likely that patients with lesions in the dominant left hemisphere had more difficulty with movements requiring a complex coordination and minimised trunk displacement to simplify the task. This conclusion is consistent with the interpretation from previous studies that the left (dominant) hemisphere preferentially controls the timing of complex tasks and extends this interpretation from movements involving only distal musculature to those involving both distal and proximal musculature.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the *Fonds de la recherche en santé du Québec* (FRSQ) and the National Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for financial support of this study

2.2.6 References

Archambault P, Pigeon P, Feldman AG, Levin MF (1999) Recruitment and sequencing of different degrees of freedom during pointing movements involving the trunk in healthy and hemiparetic subjects. *Exp Brain Res* 126:55-67

Berg KO, Wood-Dauphinee SL, Williams JI, Gayton D (1989) Measuring balance in the elderly: preliminary development of an instrument. *Physiother Can* 41:304-311

Berg KO, Maki BE, Williams JI, Holliday PJ, Wood-Dauphinee SL (1992) Clinical and laboratory measures of postural balance in an elderly population. *Arch Phys Med Rehabil* 73:1073-1080

Carr LJ, Harrison LM, Stephens JA (1994) Evidence for bilateral innervation of certain homologous motoneurone pools in man. *J Physiol* 475:2:217-227

Chen R, Cohen LG, Hallett M (1997) Role of the ipsilateral motor cortex in voluntary movement. *Can J Neurol Sci* 24:284-291

Colebatch JG, Gandevia SC, Spira PJ (1986) Voluntary muscle strength in hemiparesis: distribution of weakness at the elbow. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 49:1019-1024

Esparza DY, Archambault P, Levin MF (2001) The control of arm and trunk sequencing in hemiparetic subjects. *Neural Control of Movement*, Seville, March

Ferbert A, Caramia D, Priori A, Bertolasi L, Rothwell JC (1992) Cortical projection to erector spinae muscles in man as assessed by focal transcranial magnetic stimulation. *Electroenceph clin Neurophysiol* 85: 382-387

Fugl-Meyer AR, Jaasko L, Leyman I, Olsson S, Steglind S (1975) The post-stroke hemiplegic patient. I. A method for evaluation of physical performance. *Scand J Rehab Med* 7:13-31

Geffen GM, Jones DL, Geffen LB (1994) Interhemispheric control of manual motor activity. *Behav Brain Res* 64:131-140

Haaland KY, Harrington DL (1988) Hemispheric control of the initial and corrective components of aiming movements. *Neuropsychologia* 27: 961-969

Haaland KY, Harrington DL (1989) Hemispheric control of the initial and corrective components of aiming movements. *Neuropsychologia* 27:961-969

Haaland KY, Harrington DL (1994) Limb-sequencing deficits after left but not right hemispheric damage. *Brain Cognit* 24:104-122

Haaland KY, Harrington DL, Yeo R (1987) The effects of task complexity on motor performance in left and right CVA patients. *Neuropsychologia* 25: 18: 794

Hammond MC, Kraft GH, Fitts SS (1988) Recruitment and termination of electromyographic activity in the hemiparetic forearm. *Arch Phys Med Rehabil* 69: 106-110

Harrington DL and Haaland KY (1991) Hemispheric specialization for motor sequencing: Abnormalities in levels of programming. *Neuropsychologia* 29: 147-163

Harrington DL, Haaland KY (1992) Motor sequencing with left hemisphere damage. Are some cognitive deficits specific to limb apraxia? *Brain* 115: 857-874

Keele SW, Ivry R (1990) Does the cerebellum provide a common computation for diverse tasks? A timing hypothesis. *Ann N Y Acad Sci* 608:179-207

Kim SG, Ashe J, Hendrich K, Ellermann JM, Merkle H, Ugurbil K, Georgopoulos AP (1993) Functional magnetic resonance imaging of motor cortex: hemispheric asymmetry and handedness. *Science* 261:615-617

Kimura D (1977) Acquisition of a motor skill after left-hemisphere brain damage. *Brain* 100: 527-542

Kimura D (1982) Left-hemisphere control of oral and brachial movements and their relation to communication. *Philos Trans R Soc Lond* 298:135-149

Kuypers HGJM (1981) Anatomy of the descending pathways. In: *Handbook of Physiology: The Nervous System: Motor Control*. Bethesda, MD: Am Physiol Soc, pp. 597-666

Ma S, Feldman AG (1995) Two functionally different synergies during arm reaching movements involving the trunk. *J Neurophysiol* 73:2120-2122

Levin MF, Dimov M (1997) Spatial coordinates for muscle coactivation and the control of postural stability. *Brain Res* 757: 43-59

Liu CN, Chambers WW (1964) An experimental study of the cortico-spinal system in the monkey (*Macaca mulatta*): the spinal pathways and preterminal distribution of degenerating fibers following discrete lesions of the pre- and postcentral gyri and bulbar pyramid. *J Comp Neurol* 123: 257-283

Peterson BW, Pitts NG, Fukushima K (1979) Reticulospinal connections with limb and axial motoneurons. *Exp Brain Res* 36:1-20

Pigeon P, Feldman AG (1998) Compensatory arm-trunk co-ordination in pointing movements is preserved in the absence of vision. *Brain Res* 802: 274-280

Rao SM, Harrington DL, Haaland KY, Bobholz JA, Cox RW, Binder JR (1997) Distributed neural systems underlying the timing of movements. *J Neurosci* 17:5528-2235

Robinson LM, Fitts SS, Kraft GH (1990) Laterality of performance in fingertapping rate and grip strength by hemisphere of stroke and gender. *Arch Phys Med Rehabil* 71:695-698

Shima K, Tanji J (1998) Both supplementary and presupplementary motor areas are crucial for the temporal organization of multiple movements. *J Neurophysiol* 80: 3247-3260

Sunderland A, Bowers MP, Sluman SM, Wilcock DJ, Ardron ME (1999) Impaired dexterity of the ipsilateral hand after stroke and the relationship to cognitive deficit. *Stroke* 30: 949-955

Thilmann AF, Fellows SJ, Garms E (1990) Pathological stretch reflexes on the "good" side of hemiparetic patients. *J Neurol Neurosurg Psychiatr* 53:208-214

Tzeng OJL, Wang WSY (1984) Search for a common neurocognitive mechanism for language and movements. *Am J Physiol* 246: R904-R911

Velicki MR, Winstein CJ, & Pohl PS. (2000). Impaired direction and extent specification of aimed arm movements in humans with stroke-related brain damage. *Exp Brain Res* 130:362-374

Winstein CJ, Pohl PS (1995) Effects of unilateral brain damage on the control of goal-directed hand movements. *Exp Brain Res* 105: 163-174

Winstein CJ, Grafton ST, Pohl PS (1997) Motor task difficulty and brain activity: Investigation of goal-directed reciprocal aiming using positron emission tomography. *J Neurophysiol* 77:1581-1594

Wyke M (1967) Effects of brain lesions on the rapidity of arm movement. *Neurology* 17: 1113-1120

Chapitre III

3.1 DISCUSSION

Cette étude est la première qui analyse les différences hémisphériques pour la coordination entre la musculature proximale et distale chez des sujets hémiparétiques. Pour documenter ces différences hémisphériques, la tâche utilisée est un simple mouvement de pointage effectué avec le bras non-parétique. Les résultats seront discutés par rapport à la cinématique du mouvement, la coordination temporelle tronc-bras, et les différences dans le recrutement du tronc entre des sujets hémiparétiques.

3.1.1 Analyses Cinématique.

Des résultats cinématiques obtenus pour les trois groupes de sujets lors de l'exécution d'une simple tâche de pointage ont démontré des trajectoires linéaires du tronc et du doigt avec des profils de vitesse en forme de cloche. Des trajectoires linéaires du tronc et du doigt observées dans cette étude sont consistants avec des études effectués chez des sujets sains lors de l'exécution d'un mouvement d'atteinte en impliquant le tronc (Pigeon et al. 2000; Adamovich et al. 2001). D'autre part, les pics de vitesse du tronc et du doigt chez des sujets hémiparétiques ont été similaires aux ceux des sujets sains. L'absence de différences significatives dans les pics de vitesse du tronc lors de l'utilisation du bras non-parétique démontre que le tronc peut se déplacer à la même vitesse dans les deux groupes de sujets hémiparétiques malgré leur

condition. Ce résultat met en évidence que la musculature axiale est légèrement affectée après un ACV. En effet, le déplacement excessif du tronc observé chez des sujets hémiparétiques lors de l'utilisation du bras parétique indique que la musculature du tronc est presque inaltérée après une lésion hémisphérique unilatérale.

La durée totale d'exécution du mouvement n'a présenté aucune différence significative entre des sujets sains et les deux groupes de sujets hémiparétiques (données non montrées). Par contre, les résultats contradictoires ont été rapportés pour des mouvements réciproques de pointage effectués à différents indices de difficulté (Winstein et Pohl 1995; Winstein et al. 1997; Giuliani et al. 1997). Ces études diffèrent de la nôtre par le type de tâche analysée (séquentielle), les segments corporels impliqués et le but de l'étude puisqu'elles examinent l'ordre temporel des séquences d'un mouvement distal et non la coordination temporelle entre la musculature proximale et distale).

Par rapport à la localisation de la cible ou à la condition du mouvement utilisé, il n'existait aucune différence dans la trajectoire du mouvement et le profil de vitesse. Par contre, un pic de vitesse prédominant a été observé chez tous les groupes de sujets vers la cible ipsilatérale dans les deux conditions de mouvement (en phase et hors phase). Des mouvements vers la cible controlatérale ont eu un pic de vitesse plus bas, surtout dans la condition «hors phase». Les mêmes résultats par rapport à la localisation de la cible ont été observés dans une étude similaire dans lequel les sujets hémiparétiques ont utilisé le bras parétique pour effectuer le mouvement (Archambault et al. 1999).

En résumé, il n'y a pas de différences cinématiques significatives entre des sujets sains et les deux groupes des sujets hémiparétiques lors de l'exécution d'un simple mouvement de pointage effectué avec le bras non-parétique en impliquant le tronc. Notre principale observation cinématique est que lorsque la coordination du mouvement tronc-bras devient complexe (condition hors phase à la cible controlatérale) le pic de vitesse diminue chez les sujets sains et hémiparétiques. La révision de la littérature suggère que la coordination de simples mouvements avec l'utilisation du bras ipsilatéral à la lésion est normale. Le modèle de coordination pour le bras est préservé pour exécuter activités fonctionnelles tels que des mouvements de pointage (Trombly 1993) et d'atteinte (Chieffi et al. 1993).

3.1.2 Différences cinématiques entre l'utilisation du bras non-parétique et parétique en comparaison aux sujets sains

Lorsque les deux groupes de sujets hémiparétiques utilisent le bras non-parétique pour exécuter un simple mouvement de pointage en impliquant le tronc, le profil de vitesse, la trajectoire, la durée du mouvement, les pics de vitesse du tronc et du doigt sont similaires à ceux des sujets sains. C'est donc dire que lorsque les sujets hémiparétiques utilisent le bras parétique, diverses différences cinématiques sont mises en évidence. Par exemple, pour le doigt, les trajectoires du mouvement et les profils de vitesse ne sont pas linéaires car ils démontrent une grande segmentation et variabilité (Levin 1996; Archambault et al. 1999). Par contre, pour le tronc, les trajectoires du mouvement sont

linéaires et le profil de vitesse se conserve en forme de cloche lorsque les sujets hémiparétiques utilisent le bras parétique ainsi que le non-parétique.

Les pics de vitesse du tronc et du doigt sont significativement diminués en comparaison aux sujets sains lorsque les sujets hémiparétiques utilisent le bras parétique (Archambault et al. 1999). Un comportement différent a été identifié chez les sujets hémiparétiques lors de l'utilisation du bras non-parétique dans notre étude. Finalement, il y a une augmentation de la durée lorsque le mouvement est effectué avec le bras parétique (Levin 1996; Archambault et al. 1999; Wu et al. 2000). Cette augmentation est due à la grande variabilité dans la trajectoire de la main et à la présence de quelques unités de mouvement dans le profil de vitesse. L'apparition de plusieurs unités de mouvement suggère que le SNC utilise des mécanismes de rétroaction pour corriger les erreurs dans la exécution du mouvement (Wu et al. 2000).

3.1.3 La coordination temporelle tronc-bras chez des sujets hémiparétiques

Le but de cette étude a été d'analyser la coordination temporelle chez deux groupes de sujets hémiparétiques en utilisant le bras non-parétique. Les résultats de notre étude ont démontré que le groupe de sujets sains et hémiparétiques ont commencé et ont terminé le mouvement avec le tronc dans la condition «en phase» vers les deux cibles (ipsilatérale et controlatérale). Ces résultats sont consistants avec ceux trouvés dans des études précédentes chez des sujets sains (Ma et Feldman 1995; Pigeon et Feldman 1998) en confirmant l'existence d'un patron temporel constant pour la coordination du mouvement tronc-bras lors de l'exécution d'une tâche de pointage. Cependant, dans notre

étude, le délai entre le tronc et le bras pour le début du mouvement était significativement différent chez les sujets hémiparétiques avec lésions dans l'hémisphère droit, en comparaison avec d'autres groupes de sujets. Cette différence a été caractérisée par un long délai précédent le début du mouvement vers la cible ipsilatérale et controlatérale dans la condition «en phase». Ces résultats ratifient les rapports par Fisk et Goodale (1988) pour le début du mouvement en signalant que l'hémisphère droit est importante dans la localisation spatiale de la cible. Par contre, aucune différence significative a été trouvée pour la fin du mouvement puisque la variabilité était beaucoup plus élevée avec des moyennes plus près de 0 (Fig 4).

Pour la condition «hors phase», le début du mouvement était variable. Le mouvement du tronc commençait en même temps ou avant celui du bras vers la cible ipsilatérale et controlatérale, tandis que la fin du mouvement du tronc avait lieu longtemps après celui du bras. Dans une autre étude ce même phénomène a été observé pour cette condition chez des sujets sains (Archambault et al. 1999). Cependant une grande variabilité inter-sujets a été observée pour le début et la fin du mouvement dans la condition «hors phase». Cette augmentation de la variabilité suggère que chaque sujet a un patron différent pour effectuer un mouvement de coordination complexe tronc-bras.

En général, les résultats de la coordination temporelle tronc-bras obtenus chez les sujets hémiparétiques pour exécuter le mouvement avec le bras non-parétique dans les deux conditions et vers les deux cibles, sont similaires à ceux des sujets sains. Les mêmes résultats ont été documentés pour effectuer de simples mouvements de coordination seulement en utilisant le bras ipsilatéral à

la lésion (Trombly 1993; Chieffi et al. 1993). Ces résultats suggèrent qu'il n'existe pas un hémisphère spécialisé pour le contrôle de la coordination temporelle entre la musculature proximale et distale lors de l'exécution d'un simple mouvement de pointage. Par contre, toutes les études qui analysent seulement le mouvement de la musculature distale suggèrent que l'hémisphère dominante joue un rôle importante dans le timing de tâches séquentielles de mouvement (Haaland and Harrington 1991; 1994; Winstein et Pohl 1995; 1997). En effet, l'utilisation de la stimulation magnétique transcranienne (SMT), confirme ces résultats en démontrant significativement plus d'erreurs dans la performance de séquences complexes des mouvements de la main ipsilatérale à une lésion hémisphérique lors de la stimulation de M1 gauche par rapport à la stimulation de M1 droite (Chen et al. 1997). Ces différences entre les deux hémisphères suites la stimulation d'une même aire corticale pourraient être dues à différences dans l'excitabilité cortical (Fadiga et al. 1999; Leocani et al. 2000) plutôt que à une représentation corticale ipsilatérale pour effectuer mouvements séquentiels des doigts. De plus, pour l'exécution des mouvements séquentiels, plusieurs commandes motrices sont nécessaires. L'initiation de chacune de ces commandes motrices dépendent du dernier mécanisme de rétroaction reçu spécialement sur le bout du doigt. Par contre, la coordination inter-articulaire pour exécuter un simple mouvement de pointage pourrait résulter d'une seule commande motrice (Pigeon et al. 2000). Il est probable que le SNC ait une hémisphère spécialisée lorsqu'une action requiert deux ou plusieurs commandes motrices. Dans ce cas, des informations afférentes sensorielles pourraient jouer un rôle fondamental dans l'exécution de la

deuxième commande et en conséquence, dans l'intégration sensori-motrice. Des études sur les asymétries dans l'intégration sensori-motrice démontrent un rôle dominant de cette fonction dans le cortex somato-sensoriel gauche pour effectuer des mouvements complexes avec les doigts (Okuda et al. 1995).

Dans notre étude, la différence la plus remarquable entre le groupe de sujets sains et les deux groupes de sujets hémiparétiques est la grande variabilité obtenue pour toutes les conditions et cibles. Cette variabilité pourrait être produite par des différences dans la localisation, l'extension et la date à laquelle le sujet a subi la lésion (voir table 1). Par exemple, Jones et al. (1989) ont démontré que les déficits ipsilatéraux postérieurs à un ACV par lésion dans l'aire sensori-motrice, diffèrent d'un cas à l'autre. Un autre facteur qui pourrait aussi avoir de l'influence est la variabilité individuelle dans le degré de récupération des fonctions cérébrales compensatoires. Cependant, malgré la variabilité observée dans les deux groupes des sujets hémiparétiques pour les délais au début et à la fin du mouvement, la performance motrice n'a pas été affectée. Par contre, chez des sujets hémiparétiques lors de l'utilisation du bras parétique, les délais pour le début et la fin du mouvement entre le tronc et le bras sont altérés et ils ont démontré un patron de coordination temporelle inconstant avec des déficits dans la performance motrice (Archambault et al. 1999). Des facteurs qui pourraient contribuer aux problèmes dans la coordination des mouvements tronc-bras du côté parétique dominant chez des sujets hémiparétiques droits sont : les déficits dans le contrôle du tronc modulé bilatéralement (Kuypers et al. 1981), les faiblesses musculaires (Colebatch et al.

1986) ou un désordre dans le réflexe d'étirement au niveau des muscles impliqués dans le mouvement (Levin et al. 2000).

3.3.4 Recrutement et contrôle du tronc.

Nos résultats ont démontré une différence significative dans le déplacement du tronc entre les deux groupes de sujets hémiparétiques. Les sujets avec des lésions dans l'hémisphère dominant ont utilisé significativement moins le déplacement du tronc par rapport aux sujets avec lésions dans l'hémisphère non-dominant. Dans une expérience de contrôle faite pour vérifier s'il existe un contrôle latéralisé du tronc, tous les sujets hémiparétiques ont été capables de bouger le tronc de façon similaire aux sujets sains. Ces résultats suggèrent donc que les différences observées dans le déplacement du tronc entre des sujets hémiparétiques ne sont pas dues à un contrôle latéralisé du tronc. En effet, des études anatomiques démontrent que la musculature du tronc est bilatérale et ipsilatéralement contrôlée par deux voies. La voie corticospinale ventrale qui module bilatéralement la musculature du tronc (Liu et Chambers 1964; Kuypers et al 1981) et la voie reticulospinale qui contrôle ipsilatéralement la musculature du tronc (Peterson et al. 1979). Aussi, des expériences chez des humains utilisant le SMT ont démontré qu'il y a une activation bilatérale des muscles du tronc lors l'exécution de contractions simultanées volontaires en suggérant une influence corticale bilatérale pour cette musculature (Carr et al.1994).

Le déplacement du tronc pour l'exécution d'un mouvement de pointage en-dedans de l'espace de travail pourrait résulter d'un seule commande cortical

(Pigeon et al. 2000) qui envoient des branches à niveau du tronc cérébral (Canedo et Lamas 1993). Ainsi, les axones qui descendent par la voie corticospinale innervent spécialement la musculature distale tandis que des axones qui descendent au noyau moteur du tronc cérébral innervent la musculature axiale. La convergence entre des signaux corticospinaux et reticulospinaux pourrait se produire dans des inter-neurones spinaux communes semblable aux connexions à niveau lombo-sacro pour la marche (Floeter et al. 1993). Probablement ce mécanisme de contrôle de la musculature axiale et distale à travers d'un seul output cortical est toujours présent et pourrait s'appliquer non seulement lorsque le mouvement du tronc est requis. Par exemple, pour exécuter un simple mouvement d'atteinte la musculature axiale est activée avant que la musculature du bras (Aruin et Latash 1995; Van der Fits et al. 1998). Les mêmes résultats ont été rapportés pour l'initiation de la marche où la musculature distale a été activée après que la musculature axiale (Assaiante et al. 2000). Ces évidences suggèrent que des neurones du tronc cérébral (en spécial neurones reticulospinaux) en plus de produire le mouvement du tronc s'il est nécessaire, elles coordonnent des changements posturaux dynamiques qui accompagnent le mouvement volontaire des membres. La participation active du tronc dans le mouvement volontaire peut être associée à l'influence de l'excitabilité neuronale dans des inter-neurones communes à niveau spinal qui reçoivent les outputs de la voie corticospinale et reticulospinale. Ces changements dans l'excitabilité neuronale à niveau de inter-neurones spinaux seraient modulés spécifiquement par des signaux corticospinaux qui pourraient faciliter l'action des neurones reticulospinaux. L'activation de la musculature axiale avant que la

musculature distale pourrait avoir un effet de distance. Les outputs que descendent par axones qui innervent la musculature axiale doivent parcourir moins distance que les outputs que innervent la musculature distale. Cette modèle d'activation musculaire descendant de proximale à distale met en évidence l'organisation hiérarchique du SNC pour le contrôle moteur des mouvements volontaires distales.

La coordination inter-segmentaire entre le tronc et le bras pourrait résulter d'un couplage temporelle précis des outputs descendants (corticospinal et reticulospinal) dans inter-neurones spinales. Probablement la grande variabilité obtenue pour la coordination temporelle entre le tronc et le bras ipsilatéral à la lésion pourrait être due aux déficits dans le contrôle du tronc produits par un dommage hémisphérique unilatéral. Les déficits dans la coordination temporelle associés à dommages hémisphériques unilatérales pourraient être plus importantes chez les sujets avec lésions dans l'hémisphère gauche. En effet, des évidences neurophysiologiques soutiennent que le contrôle du timing par l'hémisphère dominant pourrait être une propriété émergeant du cortex cérébral gauche, noyau de la base et le cervelet (Keele et Ivry 1990). La diminution du déplacement du tronc chez de sujets hémiparétiques avec lésions dans l'hémisphère dominant pourrait plutôt être reliée avec d'autres facteurs : le déficit dans la coordination inter-articulaire du bras (Levin 1996), la spasticité, les faiblesses musculaires (Bourbonnais et Vanden Noven 1989; Wiesendanger 1990) et les déficits dans la co-contraction musculaire (Hammond et al. 1988; Levin et Dimov 1997).

3.2 Conclusion

L'objectif principal de cette étude est de déterminer quel hémisphère cérébral joue un rôle différentiel dans la coordination temporelle entre la musculature proximale et distale chez deux groupes de sujets hémiparétiques avec lésions dans l'hémisphère dominant ou non-dominant. Nous avons utilisé deux conditions de mouvement en combinaison avec deux types de cibles pour analyser un modèle de coordination tronc-bras simple et un complexe. Nos résultats ont démontré que la coordination temporelle du mouvement tronc-bras chez les sujets hémiparétiques lors de l'utilisation du bras non-parétique n'est pas contrôlée préférentiellement par l'hémisphère dominant. La performance motrice chez les sujets hémiparétiques en utilisant le bras non-parétique a été conservée lors de l'exécution d'un mouvement de pointage en impliquant le tronc. Cependant, il y a eu une grande variabilité temporelle chez les deux groupes de sujets hémiparétiques en comparaison aux sujets sains lorsqu'ils ont effectué les mouvements de coordination simple et complexe en utilisant le bras non-parétique. Pour les mouvements de coordination complexe tronc-bras, les résultats de cette étude ont démontré que pour les sujets sains et hémiparétiques, il n'existe aucun patron temporel de coordination établi. Chaque individu pourrait avoir son propre patron de coordination temporel entre la musculature proximale et distale.

Des différences hémisphériques sont évidentes lorsque les sujets (sains et hémiparétiques) utilisent la musculature distale pour effectuer des mouvements séquentiels avec un indice de difficulté élevé. Probablement ces

mêmes différences existeraient lors de la coordination temporelle tronc-bras en appliquant une tâche séquentielle de mouvement.

L'utilisation de la réadaptation physique dans le bras ipsilatéral à une lésion hémisphérique pourrait aider à rétablir le patron de coordination temporelle entre la musculature proximale et distale chez des sujets qui ont subi un ACV.

3.3. Bibliographie.

Adamovich SV, Archambault PS, Ghafouri M, Levin MF, Poizner H, Feldman AG. (2001) Hand trajectory invariance in reaching movements involving the trunk. *Exp Brain Res.* 138 (3) : 288 – 303

Amunts K, Schlaug G, Schleicher A, Steinmetz H, Dabringhaus A, Roland PE, Zilles K. (1996) Asymmetry in the human motor cortex and handedness. *Neuroimage.* 4: 216 - 222.

Andersen RA, Snyder LH, Bradley DC, Xing J. (1997) Multimodal representation of space in the posterior parietal cortex and its use in planning movements. *Annu Rev Neurosci.* 20: 303 - 330.

Archambault P, Pigeon P, Feldman AG, Levin MF. (1999) Recruitment and sequencing of different degrees of freedom during pointing movements involving the trunk in healthy and hemiparetic subjects. *Exp Brain Res.* 126 (1): 55 - 67

Aruin AS, Latash ML (1995) Directional specificity of postural muscles in fed-forward postural reaction during fast voluntary arm movements. *Exp brain Res.* 102 : 323 – 332.

Assaiante C, Woollacott M, Amblard B (2000) development of postural adjustment during gait initiation : kinematic and EMG analysis. *Journal of Motor Behavior.* 32 (3) 211 – 226.

Benton AL, Meyers R, Polder GJ. (1962) Some aspects of handedness, *Psychiat. Neurol. Basel,* 144 : 321 - 337

Bernstein N. (1967) *The coordination and regulation of movements.* Pergamon Press, Oxford, 196 p.

Bourbonnais D, Vanden Noven S. (1989) More on muscle strength measurement. *Phys Ther.* 69 (11) : 990 - 994.

Caminiti R, Ferraina S, Johnson PB. (1996) The sources of visual information to the primate frontal lobe: a novel role for the superior parietal lobule. *Cereb Cortex.* 6(3):319 - 328.

Canedo A, and Lamas JA. (1993) Pyramidal and corticospinal synaptic effects over reticulospinal neurones in the cat. *J Physiol (Lond)* 463: 475 - 489.

Carr LJ, Harrison LM, Stephens JA.(1994) Evidence for bilateral innervation of certain homologous motoneurone pools in man. *J. Physiology* 475.2 MS.2245 217-227

Colebatch JG, Gandevia SC, Spira PJ. (1986) Voluntary muscle strength in hemiparesis: distribution of weakness at the elbow. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 49 (9) :1019 - 1024.

Dee HL, Benton AL, Van Allen MW. (1970) Apraxia in relation to hemispheric locus of lesion and aphasia, *Trans. Am. Neurol. ASS.* 95 : 147- 145

Chen R, Cohen LG, Hallett M. (1997) Role of the ipsilateral motor cortex in voluntary movement. *Can J Neurol Sci.* 24 (4): 284 -291.

Chieffi S, Gentilucci M, Allport A, Sasso E, Rizzolatti G. (1993) Study of selective reaching and grasping in a patient with unilateral parietal lesion. *Brain* 116 : 1119 – 1137.

Fadiga L, Buccino G, Craighero L, Fogassi L, Gallese V, Pavesi G (1999) Corticospinal excitability is specifically modulated by motor imagery : a magnetic stimulation study. *Neurophysiologia* 37 : 147 – 158.

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

Fisk JD, Goodale MA. (1988) The effects of unilateral brain damage on visually guided reaching: hemispheric differences in the nature of the deficit. *Exp Brain Res.* 72 (2): 425 - 435.

Flanders M, Helmes Tillery SI, Soechting JF. (1992) Early stages in a sensorimotor transformation. *Behav Brain Sci.* 15 : 309 – 362.

Floeter MK, Sholomenko GN, Gossard J-P, and Burke RE. (1993) Disynaptic excitation from the medial longitudinal fasciculus to lumbosacral motoneurons: modulation by repetitive activation, descending pathways, and locomotion. *Exp Brain Res.* 92: 407 - 419

Fogassi L, Gallese V, Fadiga L, Luppino G, Matelli M, Rizzolatti G. (1996) Coding of peripersonal space in inferior premotor cortex (area F4). *J Neurophysiol.* 76 (1) : 141 -157.

Geffen GM, Jones DL, Geffen LB. (1994) Interhemispheric control of manual motor activity. *Behav Brain Res.* 64 (1-2) : 131 - 140.

Georgopoulos AP, Kalaska JF, Caminiti R, Massey JT. (1982) On the relations between the direction of two-dimensional arm movements and cell discharge in primate motor cortex. *J Neurosci.* 2 (11) :1527 - 1537

Ghez C, Krakauer J: The organization of movement. Dans ER Kandel, JH Schwartz et TM Jessell (eds), Principles of neural science 4^e édition, McGraw-Hill. pp. 668 – 672.

Giuliani CA, Purser JL, Light KE, Genova PA. (1997) Impairments in arm control in subjects with left and right hemisphere stroke. Neurorehabilitation 9 : 71 – 87

Goodale MA. (1988) Hemispheric differences in motor control. Behav Brain Res. 30 (2): 203 - 214.

Goodale MA. (1998) Visuomotor control: where does vision end and action begin? Curr Biol. 8(14): R 489 - 491.

Grafton ST, Fagg AH, Woods RP, Arbib MA. (1996) Functional anatomy of pointing and grasping in humans. Cereb Cortex. 6 (2) : 226 - 237.

Graves R. (1983) Mouth asymmetry, dichotic ear advantage and tachistoscopic visual field advantage as measures of language lateralization. Neuropsychologia. 21 (6): 641- 649.

Graves R, Landis T. (1985) Hemispheric control of speech expression in aphasia. A mouth asymmetry study. Arch Neurol. 42 (3): 249 – 251

Graziano MS, Hu XT, Gross CG. (1997) Visuospatial properties of ventral premotor cortex. J Neurophysiol. 77 (5) : 2268 - 2292

Heilman KM, Schwartz HD, Geschwind N. (1975) Defective motor learning in ideomotor apraxia, Neurology, 25 : 1018 - 1020.

Haaland KY, Harrington DL. (1996) Hemispheric asymmetry of movement Curr Opin Neurobiol. 6: 796 - 800.

Haaland KY, Harrington DL. (1994) Limb-sequencing deficits after left but not right hemisphere damage. Brain Cogn. 24 (1): 104 - 122.

Haaland KY, Harrington DL. (1992) Motor sequencing with left hemisphere damage. Are some cognitive deficits specific to limb apraxia? Brain. 115: 857 - 874

Haaland KY, Harrington DL. (1991) Hemispheric specialization for motor sequencing: abnormalities in levels of programming. Neuropsychologia. 29 (2): 147 - 163

Haaland KY, Harrington DL. (1989) Hemispheric control of the initial and corrective components of aiming movements. Neuropsychologia. 27 (7): 961-969.

Haaland KY, Harrington DL. (1987) The effects of task complexity on motor performance in left and right CVA patients. Neuropsychologia. 25 (5): 783 - 794

Haaland KY, Delaney HD. (1981) Motor deficits after left or right hemisphere damage due to stroke or tumor. Neuropsychologia. 19 (1) :17 - 27.

Hyvarinen J. (1982) Posterior parietal lobe of the primate brain. Physiol Rev. 62 (3) : 1060 - 1129

Jason GW. (1986) Performance of manual copying tasks after focal cortical lesions. Neuropsychologia. 24 (2): 181 - 191

Jeannerod M, Arbib MA, Rizzolatti G, Sakata. (1995) Grasping objects: the cortical mechanisms of visuomotor transformation. *Trends Neurosci.* 18(7): 314-320.

Jones Rd, Donaldson IM, Parkin Pj. (1989) Impairment and recovery of ipsilateral sensori-motor function following unilateral cerebral infarction. *Brain* 112: 113-132.

Kalaska JF. (1988) The representation of arm movements in postcentral and parietal cortex. *Can J Physiol Pharmacol.* 66(4): 455 - 463.

Kalaska JF, Cohen DA, Prud'homme M, Hyde ML. (1990) Parietal area 5 neuronal activity encodes movement kinematics, not movement dynamics. *Exp Brain Res.*;80 (2): 351 - 364.

Kalaska JF (1996) Parietal cortex area 5 and visuomotor behavior. *Can J Physiol Pharmacol.* 74 (4): 483 - 498.

Kaminski TR, Bock C, Gentile AM. (1995) The coordination between trunk and arm motion during pointing movements. *Exp Brain Res.* 106 (3): 457 - 466

Kandel E : From nerve cells to cognition. Dans ER Kandel, JH Schwartz et TM Jessell (eds), *Principles of neural science* 4^e édition, McGraw-Hill. pp. 392

Keele SW, Ivry R. (1990) Does the cerebellum provide a common computation for diverse tasks? A timing hypothesis. *Ann N Y Acad Sci.* 608 : 179 - 207; discussion 207-211.

Kertzman C, Schwarz U, Zeffiro TA, Hallett M. (1997) The role of posterior parietal cortex in visually guided reaching movements in humans. *Exp Brain Res.* 114 (1): 170-183.

Kim SG, Ashe J, Hendrich K, Ellermann JM, Merkle H, Ugurbil K, Georgopoulos AP. (1993) Functional magnetic resonance imaging of motor cortex: hemispheric asymmetry and handedness. *Science*. 261 (5121) : 615 – 617.

Kimura D, Archibald Y. (1974) Motor functions of the left hemisphere. *Brain*. 97(2): 337 - 350.

Kimura D. (1977) Acquisition of a motor skill after left hemisphere damage, *Brain*, 100: 527 - 542

Krakauer J, Ghez C : Voluntary movement. Dans ER Kandel, JH Schwartz et TM Jessell (eds), *Principles of neural science* 4^e édition, McGraw-Hill. pp. 775

Kuypers H.G.J.M. Anatomy of the descending pathways. *Handbook of Physiology. The Nervous System. Motor Control*. Bethesda, MD, AM. Physiol. Soc., 1981, pp. 597 – 666

Lacquaniti F, Soechting JF (1982) Coordination of arm and wrist motion during a reaching task. *J Neurosci*. 2(4) : 399 - 408.

Leocani L, Cohen GL, Wassermann EM, Ikoma K, Hallett M (2000) Human corticospinal excitability evaluated with transcranial magnetic stimulation during reaction time paradigms. *Brain* 123 : 1161 – 1173.

Levin MF, Selles RW, Verheul MH, Meijer OG. (2000) Deficits in the coordination of agonist and antagonist muscles in stroke patients: implications for normal motor control. *Brain Res*. 853 (2) : 352 – 369

Levin MF, Dimov M. (1997) Spatial zones for muscle coactivation and the control of postural stability. *Brain Res*. 757 (1) : 43 - 59

Levin MF. (1996) Interjoint coordination during pointing movements is disrupted in spastic hemiparesis. *Brain*. 119 (Pt 1): 281 - 293

Liepmann H. Motor aphasia, anarthria, and apraxia. *Trans. 17th Int. Congr. Med. 1913 Section XI Pt 2*: 97 - 106

Liu CN, Chambers WW. (1964) An experimental study of the cortico spinal system in the monkey (*Macaca mulatta*). *J. Comp. Neurol.* 123: 257 - 284

Ma S, Feldman AG. (1995) Two functionally different synergies during arm reaching movements involving the trunk. *J Neurophysiol.* 73 (5) :2120 - 2122

Mateer C, Kimura D. (1977) Impairment of nonverbal oral movements in aphasia, *Brain Lang*, 4: 262 – 276

Mushiake H, Inase M, Tanji J. (1991) Neuronal activity in the primate premotor, supplementary, and precentral motor cortex during visually guided and internally determined sequential movements. *J Neurophysiol.* 66 (3) : 705 - 718.

Okuda B, Tanaka H, Tomino Y, Kawabata K, Tachibana H, Sugita M. (1995) The role of the left somatosensory cortex in human hand movement. *Exp Brain Res.* 106 : 493 – 498.

Peterson BW, Pitts NG, Fukushima K. (1979) Reticulospinal connections with limb and axial motoneurons. *Exp. Brain Res.* 36: 1 – 20

Pigeon P, Yahia LH, Mitnitski AB, Feldman AG. (2000) Superposition of independent units of coordination during pointing movements involving the trunk with and without visual feedback. *Exp Brain Res.* 131 (3) : 336 - 349.

Pigeon P, Feldman AG. (1998) Compensatory arm-trunk coordination in pointing movements is preserved in the absence of visual feedback. *Brain Res.* 802 (1-2) : 274 - 280.

Provins KA, Cunliffe P. (1972) The reliability of some motor performance test of handedness, *Neuropsychologia*, 10: 19 – 206

Rapin I, Tourke L, Costa LD. (1966) Evaluation of the purdue pegboard as a screening test for brain damage, *Dev . Med. Child Neur.* 8 – 45

Rushworth MF, Krams M, Passingham RE. (2001) The attentional role of the left parietal cortex: the distinct lateralization and localization of motor attention in the human brain. *J Cogn Neurosci.* 13 (5): 698 - 710.

Satz P, Achenbach K, Fennell E. (1967) Correlations between assessed manual laterality and predicted speech laterality in a normal population, *Neuropsychologia*, 5: 295 – 310

Savaki HE, Raos VC, Dalezios Y. (1997) Spatial cortical patterns of metabolic activity in monkeys performing a visually guided reaching task with one forelimb. *Neuroscience.* 76(4): 1007- 1034.

Sakata H, Takaoka Y, Kawarasaki A, Shibutani H. (1973) Somatosensory properties of neurons in the superior parietal cortex (area 5) of the rhesus monkey. *Brain Res.* 64: 85 -102.

Sakata H, Taira M, Kusunoki M, Murata A, Tanaka Y. (1997) The parietal association cortex in depth perception and visual control of hand action. *Trends Neurosci.* 20(8): 350 - 357.

Soechting JF, Lacquaniti F. (1981) Invariant characteristics of a pointing movement in man. *J Neurosci.* 1 (7) :710 - 720.

Sunderland A, Bowers MP, Sluman SM, Wilcock DJ, Ardron ME. (1999) Impaired dexterity of the ipsilateral hand after stroke and the relationship to cognitive deficit. *Stroke*. 30 (5): 949-955.

Tanji J. (1994) The supplementary motor area in the cerebral cortex. *Neurosci Res*. 19 (3) :251 - 268.

Taylor HG, Heilman KM. (1980) Left-hemisphere motor dominance in righthanders *Cortex*. 16 (4): 587 - 603

Triggs WJ, Calvanio R, Macdonell RA, Cros D, Chiappa KH. (1994) Physiological motor asymmetry in human handedness: evidence from transcranial magnetic stimulation. *Brain Res*. 636 (2): 270 - 276.

Trombly C. (1993) Observations of improvement of reaching in five subjects with hemiparesis. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 56 : 40 – 45.

Vingerhoets G, Stroobant N. (1999) Lateralization of cerebral blood flow velocity changes during cognitive tasks. A simultaneous bilateral transcranial Doppler study. *Stroke*. 30 (10): 2152 - 2158.

Volkman J, Schnitzler A, Witte OW, Freund H. (1998) Handedness and asymmetry of hand representation in human motor cortex. *J Neurophysiol*. 79 (4) : 2149 - 2154.

Wassermann EM, McShane LM, Hallett M, Cohen LG. (1992) Noninvasive mapping of muscle representations in human motor cortex. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 85 (1) :1 - 8.

Wiesendanger M. (1990) Weakness and the upper motoneurone syndrome: a critical pathophysiological appraisal. In: Berardelli A, Benecke R, editors. Motor disturbances II. London: Academic Press, 319 - 331

Winstein CJ, Grafton ST, Pohl PS. (1997) Motor task difficulty and brain activity: investigation of goal-directed reciprocal aiming using positron emission tomography. *J Neurophysiol.* 77 (3):1581 - 1594.

Winstein CJ, Pohl PS. (1995) Effects of unilateral brain damage on the control of goal-directed hand movements. *Exp Brain Res.* 105(1):163-74

Wyke M. (1967) Effect of brain lesions on the rapidity of arm movement. *Neurology.* 17 (11) : 1113 -11 20.

Wu C, Trombly CA, Lin K, Tickle-Degnen L. (2000) A kinematic study of contextual effects on reaching performance in persons with and without stroke: influences of object availability. *Arch Phys Med Rehabil.* 81 (1) : 95 - 101

Zurif EB, Carson G. (1970) Dyslexia in relation to cerebral dominance and temporal analysis, *Neuropsychologia*, 8: 351 – 361