

MATHIEU GERMAIN ROBITAILLE

**EFFETS DES CONTRAINTES DE PRÉCISION ET DE  
LA NATURE D'UN POINTAGE SUR LA  
COORDINATION ENTRE LA TÊTE ET LA MAIN**

Mémoire présenté

à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise en kinésiologie  
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.)

DÉPARTEMENT DE KINÉSIOLOGIE  
FACULTÉ DE MÉDECINE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2012

## Résumé

Les mouvements de pointage exécutés simultanément à un mouvement de la tête requièrent une coordination temporelle entre ces deux effecteurs. Ce présent travail propose d'étudier cette coordination lors de pointages discrets et réciproques nécessitant divers niveaux de précision (ID). L'étude portait sur la cinématique des deux segments (c.-à-d., main et tête) et la coordination entre ceux-ci. Les résultats montrent une adaptation des mouvements de la tête en fonction des contraintes de précision (ID) lors des pointages réciproques contrairement à la condition discrète où aucun effet n'était présent. Comme les mouvements de la main suivaient la loi de Fitts lors des deux types de pointages, le patron de coordination utilisé est adapté aux contraintes de précision et à la nature de la tâche à produire. Ces résultats suggèrent que les observations obtenues lors de pointages discrets ne devraient pas être transférées de facto aux mouvements réciproques.

## **Abstract**

Visually corrected movements involving head and hand movements require a temporal coordination between both effectors. The present work observes this coordination during discrete and reciprocal pointings with various accuracy requirements (ID). The kinematics of the two segments and the coordination between them was examined. Results show a modification of head movements in function of the accuracy requirements (ID) during reciprocal pointings which was not the case during discrete pointings. Since hand movements followed Fitts' law during both types of pointings, the coordination pattern adapted to both the accuracy constraints and the nature of the executed movement. These results suggest observations made during discrete pointings should not be transferred de facto to reciprocal movements.

## Avant-Propos

Ces trois dernières années furent remplies d'aventures et de plaisirs. J'aimerais profiter de ces quelques phrases afin d'honorer ceux qui m'ont accompagné à travers toutes ces péripéties.

Tout d'abord, je souhaiterais remercier Normand Teasdale pour son travail sans relâche et sa confiance à mon égard au cours de toutes ces années. Tes interventions furent toujours pertinentes et tes conseils toujours judicieux. J'espère avoir la chance de continuer à travailler avec toi pour longtemps. Merci particulièrement pour l'aide fournie lors de la préparation et de la publication de mon premier papier.

Je tiens aussi à remercier Romain Terrier et Nicolas Forestier. Sans vous, mon projet de maîtrise ne se serait jamais matérialisé aussi agréablement. J'ai adoré acquérir et traiter les données avec Romain. Je suis reconnaissant de votre accueil et de celui de Grégoire, qui a éventuellement mené à l'élaboration de ce manuscrit. J'espère avoir le plaisir de discuter à nouveau autour de quelques boissons rafraîchissantes!

Je souhaiterais remercier tous les étudiants avec qui j'ai eu tant de plaisir. Merci à Martin, Grant, Jean-Philippe, Yoan, Léandre, Charles, Michaël, Jérôme, Julien, Gabriel pour les discussions et les réponses à mes questions. Je ne voudrais surtout pas oublier les quelques femmes du laboratoire, Alexandra, Annie-Pier et celles qui ont fait des passages plus courts, Andréanne, Léa, Josée, Lysa et Jaime. La liste ne pourrait être complète sans ajouter les experts Marcel, Martin et Philippe, merci encore pour vos enseignements et votre collaboration. Les dîners et soirées bien arrosés que nous avons partagés me resteront toujours chers, je me souviendrai de l'ambiance du GRAME comme celle d'une famille. Les leçons de vie que j'ai reçues au cours de mon passage me sont précieuses. J'ai passé grâce à vous tous des moments merveilleux que je n'oublierai jamais.

Les derniers, mais non les moindres sont mes parents et mon frère que j'aimerais remercier de leur aide, de leur support et de leur amour lors de ces travaux.

## Table des matières

Résumé.....	I
Abstract.....	II
Avant-Propos.....	III
Table des matières.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	V
LISTE DES FIGURES.....	V
1 - INTRODUCTION.....	1
2 – RECENSION DES ÉCRITS.....	3
2.1 Modèles et lois qui régissent l'exécution de pointages.....	3
<b>2.1.1 Définition des tâches de pointages discrets et répétitifs</b> .....	3
<b>2.1.2 Modèles décrivant les mouvements de pointages</b> .....	4
<b>2.1.3 Loi de Fitts</b> .....	5
2.2 Utilisation des informations sensorielles dans le cadre d'une tâche de pointage....	6
<b>2.2.1 Contribution des informations visuelles</b> .....	6
<b>2.2.2 Contribution des informations proprioceptives et de la copie d'efférence</b>	7
<b>2.2.3 Utilisation des différents types de référentiels spatiaux</b> .....	8
<b>2.2.4 Influence de la rotation de la tête sur des tâches motrices</b> .....	9
2.3 Coordination des yeux, de la tête et de la main.....	11
<b>2.3.1 Coordination des mouvements de la tête et des yeux lors de saccades oeil-tête</b> .....	11
<b>2.3.2 Coordination des mouvements de la tête, des yeux et de la main lors de tâches discrètes</b> .....	12
<b>2.3.3 Coordination des yeux et de la main lors de tâches répétitives</b> .....	13
<b>2.3.4 Problématique</b> .....	14
3 – HAND-HEAD COORDINATION CHANGES FROM DISCRETE TO RECIPROCAL HAND MOVEMENTS FOR VARIOUS DIFFICULTY SETTINGS.....	16
3.1 Résumé.....	17
3.2 Abstract.....	18
3.3 Introduction.....	19
3.4 Methods.....	20
3.5 Results.....	22
3.6 Discussion.....	26
3.7 Acknowledgements.....	28
3.8 References.....	28
4 – CONCLUSION.....	30
BIBLIOGRAPHIE.....	32

## **LISTE DES TABLEAUX**

Table 1. Characteristics of the movement for the discrete (DP) and reciprocal movements (RP) .....	28
--	----

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1. Schematic of the experimental setup .....	25
Figure 2. Hand and head movement times .....	29
Figure 3. Onset and offset latencies .....	30

# 1 - INTRODUCTION

Lors de nos activités quotidiennes, nous exécutons des mouvements, certains de ceux-ci ont pour but de se déplacer, d'indiquer ou d'atteindre des objets. Peu de personnes réalisent toutefois toute la complexité derrière la production de mouvements qui nous semblent aussi simples. Le système nerveux central s'occupe d'optimiser ces mouvements, le plus souvent à notre insu. La coordination entre les différents segments (pied, bras, main) utilisés dans le mouvement est un sujet d'intérêt grandissant. Dans notre vie de tous les jours, les segments les plus souvent impliqués sont les yeux, la tête et le membre supérieur.

L'étude de la coordination entre l'œil et la main a reçu beaucoup d'attention au fil des années. Il est maintenant établi que pendant des pointages discrets effectués le plus rapidement et précisément possible, l'œil commence à se diriger vers la cible avant le départ de la main. Lorsque l'œil atteint la cible, l'ancrage est maintenu jusqu'à la fin du mouvement de la main. La répétition de ce patron de coordination suggère qu'il propose un compromis vitesse/précision optimal. Ce patron permet l'utilisation des informations rétinienne et extra-rétiniennes afin d'effectuer des corrections précoces à la trajectoire de la main.

Toutefois, une grande proportion de nos activités de la vie courante nécessite plus d'un mouvement. Au cours des dernières années, les tâches répétitives ont d'ailleurs reçu une plus grande attention (Lazzari et al., 2009; Terrier et al., 2011). La succession des pointages oblige l'œil à faire un compromis entre aider à terminer le mouvement en cours et préparer le mouvement qui suit (Lazzari et al. 2009). Ainsi, Terrier et collaborateurs (2011) ont remarqué que l'avance de l'œil était considérablement réduite durant ce type de tâche. De plus, une augmentation des contraintes de précision diminuait encore plus ce délai entre l'œil et la main.

D'autres auteurs se sont intéressés à une coordination plus globale, celle entre l'œil, la tête et la main (Biguer et al., 1984, Camahan & Marteniuk, 1991, Vercher et al., 1994). Toutefois, les différences méthodologiques entre ces travaux ne permettent pas d'établir les règles qui gouvernent cette organisation. Les ordres de terminaison du mouvement varient entre une séquence œil-tête-main constante (Biguer et al., 1984, Camahan et al., 1991) et une synchronisation de la fin du mouvement de chaque segment impliqué (Vercher et al., 1994). Ces dernières observations suggèrent un couplage entre la tête et la main.

Notre intérêt s'est donc porté sur la coordination entre la tête et la main lors des pointages discrets et réciproques (i.e. alternatifs entre deux cibles). Dans l'expérience qui a été réalisée, les sujets exécutaient des pointages de nature discrète ou réciproque entre deux cibles situées dans le plan frontal. Un total de 6 conditions étaient présentées aux sujets, deux natures de pointages et 3 niveaux de contraintes de précision, soit de 4.7 à 6.7 bits. Conformément à la loi de Fitts (Fitts, 1954), l'indice de difficulté ( $ID = \log_2(2A/W)$ ) était calculé à partir de la combinaison de l'amplitude du mouvement (A) qui ne variait pas entre les conditions et

de la taille des cibles à atteindre ( $W$ ). Ce paradigme expérimental permet d'obtenir de nouveaux résultats sur la coordination entre la tête et la main lors de pointages discrets. De plus, la comparaison de nos résultats avec ceux déjà rapportés nous a permis de déterminer si la coordination entre la tête et la main est adaptée, en fonction de la nature de la tâche, de manière similaire à celle entre l'œil et la main.

## 2 – RECENSION DES ÉCRITS

Avant de présenter notre étude, nous allons définir un cadre théorique qui nous permettra de décrire les processus régissant la coordination entre l'oeil, la tête et la main. 1) Nous allons d'abord regarder dans leur ensemble les règles et les modèles associés aux tâches de pointages. 2) Par la suite, nous porterons notre regard sur la contribution des informations sensorielles et des référentiels spatiaux dans le cadre de ces tâches. 3) Finalement, nous examinerons la contribution de la tête ainsi que la coordination entre cette dernière, l'oeil et la main lors de différents mouvements.

### 2.1 Modèles et lois qui régissent l'exécution de pointages

#### 2.1.1 Définition des tâches de pointages discrets et répétitifs

Le pointage est un mouvement ayant pour but d'atteindre une cible, ou de viser une cible hors de portée, avec un effecteur. L'effecteur du mouvement peut être n'importe quelle partie du corps que l'on peut bouger volontairement, évidemment les membres les plus utilisés sont la main, les doigts ou une extension de ceux-ci (e.g., à l'aide d'un stylet). Lorsqu'une tâche de pointage comporte un seul mouvement, elle est dite discrète alors que si elle en incorpore plusieurs, elle est qualifiée de répétitive. Les mouvements réciproques sont des mouvements d'aller-retour entre deux cibles; ils forment une subdivision des tâches répétitives. Historiquement, les tâches de pointages discrets en laboratoire sont plus utilisées que les tâches répétitives dans le champ des neurosciences comportementales. Elles ont l'avantage d'établir une dichotomie entre les phases de préparation et d'exécution. De plus, l'analyse des pointages discrets est plus aisée que celle des tâches répétitives.

La phase de préparation d'un mouvement comprend l'identification du stimulus, la sélection et la programmation de la réponse motrice tandis que la phase d'exécution débute par l'envoi de la commande motrice aux muscles et se termine en même temps que le mouvement (Schmidt et Lee, 2005). Cependant, le déroulement d'une tâche répétitive présente des caractéristiques spécifiques. Adam et collaborateurs (2000) ont comparé le temps de mouvement d'une tâche visuo-manuelle discrète à celui du premier pointage d'une tâche comprenant deux mouvements. Ils ont rapporté des temps de mouvements significativement plus courts pour les mouvements discrets et ont conclu que l'exécution du premier élément d'une séquence est ralentie par la préparation de l'élément suivant. Ainsi, ces résultats suggèrent que la phase d'exécution du premier mouvement chevauche la phase de préparation du deuxième durant une tâche répétitive. Avant de poursuivre

l'exploration des différences entre les tâches discrètes et répétitives, jetons un bref coup d'oeil aux modèles et aux lois associés au mouvement.

### **2.1.2 Modèles décrivant les mouvements de pointages**

Bien que les modèles présentés ci-dessous aient été élaborés à l'aide de tâches discrètes, ils s'appliquent aussi aux mouvements répétitifs. Woodworth (1899) a suggéré que les pointages soient composés de deux phases, une impulsion initiale et une phase de contrôle immédiat. L'impulsion initiale a pour but d'approcher l'effecteur de la cible. La phase de contrôle immédiat doit terminer le mouvement en exécutant les corrections nécessaires sur la base de rétroactions visuelles. Ce modèle posait les bases pour les développements qui ont suivi. Ainsi, les mécanismes de contrôle proactifs et rétroactifs interviennent en parallèle dans un modèle hybride proposé par Schmidt (1975). Des boucles de rétroaction permettent de corriger les imprécisions émanant de la planification initiale et de l'exécution du mouvement. Comme pour le modèle de Woodworth, la phase d'exécution du mouvement est séparée en deux phases. La première dite phase initiale ou balistique est générée en boucle ouverte, soit en absence de boucles de rétroactions. L'objectif étant de transporter la main à proximité de la cible. Cette composante correspond à la planification motrice initiale. La seconde phase, qualifiée de terminale ou de contrôle, utiliserait la vision centrale pour comparer la position de la main et celle de la cible (Paillard, 1996). L'étude de Carlton (1981) présente des résultats en faveur de ce modèle. Leurs données suggèrent que la précision terminale d'un pointage visuo-manuel soit maintenue lorsque la main n'est pas visible durant les trois premiers quarts du mouvement alors qu'elle est diminuée lorsque les rétroactions visuelles ne sont pas possibles durant le dernier quart. Finalement, le signal d'erreur relatif aux positions de la cible et de la main est réduit par l'exécution d'un ou plusieurs sous-mouvements correcteurs (Jeannerod, 1988, Milner, 1992, Paillard, 1982, 1996).

Certains auteurs postulent que la capacité de rétrocontrôle continu des mouvements d'atteinte repose sur l'existence de modèles internes découlant de l'apprentissage (Desmurget & Grafton, 2000). Un modèle interne permet la prédiction ou la vérification de l'état du système moteur suivant l'envoi d'une commande motrice. Plusieurs hypothèses sur les modes de fonctionnement des modèles internes furent émises au cours des années ; soit les modèles internes proactifs, rétroactifs et hybrides.

Un modèle purement proactif suggère que la trajectoire de la main soit entièrement prévue avant le début du mouvement, et que peu de corrections se produisent avant la toute fin du mouvement.

Un modèle purement rétroactif propose que la trajectoire de la main ne soit établie qu'après la localisation de la cible en vision centrale et que des corrections aient lieu tout au long du pointage pour acheminer la main à sa destination. Tel que suggéré par Desmurget et Grafton (2000), les modèles internes purement proactifs et rétroactifs sont trop réductionnistes.

Le prochain exemple montre le déroulement d'une tâche de pointage selon le modèle interne hybride. La phase de planification débute par l'identification, puis la sélection et la programmation de la réponse motrice ont lieu. La planification initiale du mouvement ne se déroule toutefois pas sans modifications. Durant l'exécution d'une tâche de pointage, la position de l'effecteur à la fin du mouvement est prédite par un modèle interne hybride. Le déplacement oculaire permettant la localisation de la cible se produit après l'initiation du mouvement de l'effecteur. Ensuite, tout au long du mouvement, cette estimation peut être comparée continuellement à la position réelle de la cible repérée en vision centrale. Un ancrage visuel rapide sur la cible permet donc un rétrocontrôle continu des mouvements d'atteinte et favorise ainsi la mise en place de corrections précoces à la trajectoire du mouvement. En effet, un ancrage sur la cible dès la phase initiale du mouvement est compatible avec la mise en place d'un rétrocontrôle efficace basé sur la perception du déplacement de la main en vision périphérique.

### **2.1.3 Loi de Fitts**

Loi de Fitts  $TM = a + b * ID$ ,  $ID = \log_2(2A/W)$

La loi de Fitts stipule que la relation entre l'indice de difficulté (ID) et le temps de mouvement (TM) est linéaire. Les paramètres a et b sont des constantes alors que A est l'amplitude du mouvement et W l'erreur permise (taille de la cible). Donc, le degré de contrôle requis pour la production d'un mouvement, c'est-à-dire la quantité d'information nécessaire pour spécifier une réponse, est le facteur limitant la vitesse de la performance motrice (Fitts, 1954). Autrement dit, cette loi exprime le compromis vitesse/précision lors de la production d'un mouvement. Comme l'indice de difficulté représente une quantité d'information, il est mesuré en bit. Formulée à partir de pointages, de transferts d'anneaux et de bâtonnets exécutés le plus rapidement possible, cette loi a depuis été vérifiée pour une foule d'autres tâches et dans des contextes différents (pour une revue détaillée, voir Plamondon et Alimi, 1997). Ainsi, la loi de Fitts s'applique à des sujets jeunes et âgés pour une tâche de pointage où la tête était l'effecteur par le biais d'un dispositif d'acquisition des mouvements de la tête (Passmore et al., 2007, 2010, Descarreaux et al., 2010, Jagacinski et al., 1985).

En résumé, la production de mouvements discrets et répétitifs comprend deux phases, la préparation et l'exécution du mouvement. Le mouvement est corrigé sur la base d'un modèle interne qui vérifie et prédit les conséquences des commandes motrices envoyées aux muscles. La loi de Fitts exprime la relation entre la précision exigée et le temps requis pour produire un mouvement. Une description du rôle des informations sensorielles dans la planification et l'exécution du mouvement est présentée dans la section suivante.

## 2.2 Utilisation des informations sensorielles dans le cadre d'une tâche de pointage

### 2.2.1 Contribution des informations visuelles

La vision fournit des informations qualifiées d'afférentes, car le signal visuel qui provient de la périphérie est dirigé vers le système nerveux central. Les informations visuelles sont détectées par la rétine à l'aide de deux types de photorécepteurs : les cônes et les bâtonnets. Les cônes sont concentrés au centre de la rétine dans la très restreinte région fovéale (1mm de diamètre, Goldberg, 2000). Ce type de photorécepteurs se spécialise dans la détection des couleurs et des formes. La densité des cônes devient nulle en dehors de la rétine centrale, zone de 15 degrés d'excentricité autour de la fovéa (Paillard, 1996). Les bâtonnets sont présents partout à l'exception de la fovéa, mais ils abondent surtout au niveau de la rétine périphérique. Bien que leur résolution spatiale soit moindre que celle des cônes, leur fréquence temporelle de décharge est beaucoup plus élevée. Donc, les bâtonnets perçoivent des déplacements jusqu'à 50 fois plus rapides que les cônes (Paillard, 1996). Ainsi, lorsqu'une cible est localisée en vision centrale, elle est située à moins de 15 degrés du centre de la fovéa alors que si son excentricité dépasse 15 degrés, il est possible de la repérer en vision périphérique. Par conséquent, la localisation spatiale d'une cible est plus précise lorsqu'elle est détectée en vision centrale plutôt qu'en vision périphérique.

L'oeil n'est pas seulement un organe sensoriel, mais également un organe moteur. L'oeil doit bouger fréquemment afin d'obtenir une capture d'information efficace. Cette capacité de l'oeil de bouger permet de compenser pour la restriction spatiale imposée par la vision centrale. Pour ce faire, la saccade permet de diriger la fovéa vers la cible d'intérêt de manière extrêmement rapide. Toutefois, ce déplacement de l'oeil a un prix, la suppression saccadique, il est en effet impossible de percevoir un flash lumineux pendant une saccade oculaire (Volkman et al., 1968). L'extraction d'information visuelle par le système nerveux central étant rendu impossible par l'ampleur de la vitesse du globe oculaire.

En 1982, Ungerleider et Mishkin suggéraient qu'il existe deux voies empruntées par des influx nerveux issues du cortex visuel primaire, une pour les paramètres d'identification et l'autre pour ceux concernant la localisation des stimuli. Toutefois, Goodale et Milner (1992) soulèvent un point faible de ce modèle en précisant que la saisie d'un objet nécessite à la fois des informations sur sa localisation ainsi que des renseignements sur sa forme et sa taille afin d'ajuster la pince digitale. En conséquence, une dissociation théorique aussi prononcée entre les processus d'identification et ceux de localisation semble difficile à concevoir. Ces auteurs ont donc suggéré que les deux voies aient accès aux mêmes informations mais que ce soit le traitement appliqué sur celles-ci qui diffère.

Lors d'un pointage, les informations obtenues par la fovéa sont utilisées tout au long de la tâche lorsqu'elles sont disponibles. Ce ne sont toutefois pas les seuls signaux fournis par l'oeil durant le mouvement. La vision périphérique permet de détecter la trajectoire de la main alors que la cible est fovéalisée. Ainsi, des

corrections progressives de l'amplitude ou de la direction de la trajectoire peuvent être effectuées (Saunders & Knill 2005, Sarlegna et al., 2004).

La vision est une ressource précieuse en grande demande. Ainsi, elle est relocalisée à un autre emplacement dès qu'elle n'est plus requise pour une tâche parce que d'autres sens, tels le toucher et la proprioception ont pris le relais (Land, 2009). Durant l'exécution d'une tâche, très peu d'informations visuelles demeurent inutilisées dans les secondes suivant leur acquisition (Land, 2009). En observant des musiciens de différents niveaux d'expertise jouer à vue une partition inconnue, Land et Furneaux (1999) suggèrent l'existence d'un ou de plusieurs tampons qui permettent de retenir les informations. En observant le temps entre la lecture de la note et l'instant où elle est jouée, la durée du tampon peut être établie. La durée de ce tampon, généralement d'une seconde, variait durant la pièce jouée selon le tempo, jusqu'à un maximum de 3 secondes. De plus, en observant des mouvements aussi variés que le tennis de table et la conduite automobile, ces auteurs notent aussi que la capacité de ce ou ces tampons varie en fonction de la tâche exécutée.

### **2.2.2 Contribution des informations proprioceptives et de la copie d'efférence**

Sherrington introduit en 1906 le terme proprioception, soit la capacité de connaître la position et les déplacements des segments de son corps dans l'espace, sans recourir à la vision. Cette aptitude repose sur les signaux afférents provenant des mécanorécepteurs périphériques cutanés, articulaires, tendineux et musculaires. Les informations proprioceptives sont utilisées afin de localiser la main avant l'initiation du mouvement (Rossetti, 1995). Ces auteurs ont utilisé des prismes afin de perturber la localisation visuelle initiale de la main sans toutefois affecter la position perçue de la cible à atteindre. Lors de l'initiation du mouvement, la vision de la main était bloquée. L'amplitude de l'erreur terminale induite correspondait au tiers de la déviation causée par les prismes. Ces résultats suggèrent que la main au départ du mouvement soit localisée grâce aux informations proprioceptives, en plus des informations visuelles.

En utilisant un paradigme pour le moins hors du commun, Gauthier et collaborateurs (1990) ont démontré le rôle de la proprioception des muscles oculaires dans la localisation de cibles visuelles. Le paradigme en question nécessitait de dévier de 30 degrés dans une direction un seul oeil du sujet. La vision de l'oeil en question était bloquée. Par la suite, le sujet devait effectuer des pointages ainsi que situer l'axe antéro-postérieur du tronc à l'aide de sa main. Les résultats des pointages et la direction indiquée par le sujet étaient déviés de 4 à 6 degrés dans le sens de la déviation. Toutefois, aucun sujet n'a remarqué de changement quant à la position de la cible vue par l'oeil normal et ce, en aucun moment. Les auteurs suggèrent que les informations afférentes (visuelles et proprioceptives) et efférentes (copie d'efférence, voir ci-dessous) des deux yeux soient utilisées, et ce peu importe que les deux yeux fixent la cible ou non.

Un sujet désafférenté, i.e. dépourvu de toute proprioception, maintient la capacité de faire des corrections précoces à la trajectoire de son mouvement même s'il est privé de la vision de sa main (Bard et al., 1999). Ces auteurs ont utilisé un paradigme de saut de cible pendant la suppression saccadique afin d'augmenter l'erreur associée à la localisation de la cible en vision périphérique. Le sujet ne pouvant utiliser ni la vision de sa main, ni sa proprioception pour effectuer ces corrections, les auteurs ont conclu que les corrections observées sont exécutées sur la base de l'estimation de la position terminale du mouvement issue de la copie d'efférence de la saccade oculaire. Le principe de la copie d'efférence suppose qu'une copie de la commande motrice de la saccade oculaire peut être utilisée afin d'obtenir la position de certains objets dans le champ visuel.

### **2.2.3 Utilisation des différents types de référentiels spatiaux**

Maintenant que nous avons pris connaissance des différentes contributions de la proprioception et du système visuel, abordons les différents types de référentiels spatiaux utilisés afin de représenter le mouvement par rapport à l'espace dans lequel il se produit. Il existe deux types de référentiels soit les référentiels égocentrés et exocentrés. D'une part, les référentiels égocentrés ont pour but de représenter l'espace par rapport à une partie du corps, ils sont centrés traditionnellement sur l'oeil, la tête ou la main. D'autre part, les référentiels exocentrés visent à représenter l'espace par rapport à un objet externe au corps mais qui se situe dans le champ visuel. Ainsi, dans ces deux types de cadre de référence, les translations et rotations des différentes parties du corps sont représentées par rapport à l'origine du référentiel. Des données récentes mettent en évidence que la position des cibles serait codée dans un référentiel centré sur l'oeil (Henriques et al., 1998; Batista et al., 1999; Medendorp & Crawford, 2002). Il semble d'ailleurs que ce référentiel prédomine à partir de l'âge de 4 ans, moment auquel un patron de recrutement descendant des muscles cervicaux, thoraciques et lombaires apparaît (Van der Fits et al., 1999; Van der Heide et al., 2003). Afin de définir les paramètres du mouvement à exécuter précisément, les positions des objets repérés visuellement dans un référentiel exocentrique doivent être transformées dans un référentiel égocentrique. Ainsi, la position de l'image sur la rétine, celle de l'oeil dans son orbite et celle de la tête par rapport au corps sont nécessaires dans le transfert entre les deux référentiels. Les informations rétinienne et extra-rétinienne sont utilisées pour le codage de la position de l'oeil dans son orbite (Blouin et al., 1995, 2002; Bridgeman & Stark, 1991). L'expression « informations extra-rétiniennes » fait référence à la copie d'efférence ainsi qu'aux informations proprioceptives oculaires. Les signaux proprioceptifs nucaux et vestibulaires, quant à eux, participent au codage de la position de la tête (Karnath et al., 1994, Blouin et al., 1998).

Le transfert d'un référentiel à l'autre engendre des erreurs, causées soit par des imperfections dans la cartographie des référentiels ou par du bruit induit par les calculs nécessaires à ces transformations (Sober

& Sabes, 2003). Les résultats de Bock (1993) suggèrent une surestimation systématique de l'excentricité d'une cible localisée en vision périphérique. La précision des mouvements est maximale lorsque la cible peut être représentée dans un référentiel égocentrique centré sur la tête. Par contre, celle-ci diminue lorsque la représentation utilise un référentiel égocentrique centré sur la main et elle est minimale lorsque seule une représentation exocentrique est possible (Thaler & Todd, 2009). Toutefois, certaines études proposent que la redondance des représentations permet d'expliquer l'ordre de précision observé (Thaler & Todd, 2009, Thompson & Henriques, 2010), par rapport à l'hypothèse que seule la précision de chacun des référentiels utilisés individuellement expliquait cet ordre.

#### **2.2.4 Influence de la rotation de la tête sur des tâches motrices**

Avant de traiter de l'utilisation de la tête dans différentes tâches, jetons un coup d'oeil à l'influence d'une rotation de la tête sur la perception de certains axes et l'exécution de différentes actions. Les tâches de perception de l'axe antéro-postérieur et gravitationnel ont été utilisées afin de déterminer l'influence de la rotation de la tête, donc du désalignement du référentiel centré sur la tête par rapport à celui du tronc. La précision de la perception de chaque axe permet de mesurer si une préférence existe pour un axe ou un autre. Il ne semble pas y avoir de préférence entre l'axe antéro-postérieur du tronc et celui de la tête en condition de vision normale lorsqu'une rotation est effectuée autour de l'axe vertical de la tête (Darling et al., 1996). Par contre, les mêmes auteurs notent qu'une rotation de la tête effectuée autour de l'axe longitudinal du tronc, lorsque les axes antéro-postérieurs de la tête et du tronc sont déjà désalignés, engendre des perturbations importantes dans les perceptions visuelles et proprioceptives. L'axe gravitationnel est préféré par rapport à l'axe longitudinal du tronc ou de la tête pendant une tâche de perception visuelle (Darling & Hondzinski, 1997). La présence d'informations visuelles n'affecte pas la perception de la verticale. Ainsi, l'utilisation d'un référentiel exocentrique n'aide pas au jugement de l'orientation d'un objet par rapport au référentiel gravitationnel (Darling & Hondzinski, 1997). Il semble que la capacité à orienter l'avant-bras le long de l'axe antéro-postérieur ou gravitationnel dépend majoritairement de l'angle de l'épaule et non de la position de la tête et des yeux dans l'espace (Darling et al., 2000). Ceci suggère que bien que la localisation de la position initiale de la main lors d'un pointage dépend des informations proprioceptives (Desmurget et al., 1997) et visuelles (Prablanc et al., 1979), l'utilisation d'un seul de ces deux types de signaux ne permet pas une précision maximale.

Comme nous l'avons vu précédemment, la perception de l'orientation d'un objet est affectée par une rotation de la tête. Puisque la préparation et l'exécution d'un mouvement reposent sur la perception de l'environnement, le mouvement pourrait être perturbé par une rotation de la tête. C'est précisément les résultats qu'ont obtenus Guerraz et collaborateurs (2003) lors d'une tâche de reproduction de formes

géométriques en absence de vision. Ils ont observé une inclinaison de la figure reproduite dans le sens opposé à la rotation de la tête, cette inclinaison était de moins grande amplitude que la rotation de la tête. De plus, cet effet augmentait en décubitus dorsal par rapport à la position assise. Ces auteurs ont donc suggéré que les informations vestibulaires et proprioceptives nucales contribuent au contrôle de mouvement du bras en l'absence de la vision. Lorsqu'une rotation selon l'axe antéro-postérieur de la tête est maintenue en absence de vision durant une longue période, il semble que le système nerveux central surestime la déviation durant les premières minutes (Guerraz et al., 2006). Les auteurs suggèrent que le système nerveux central soit très efficace pour encoder et détecter des changements qui se produisent sur de courtes durées sur la base des informations sensorielles et ainsi déterminer sa position relative. Toutefois, il ne serait pas très bien informé à propos de sa position absolue dans l'espace. Lors d'une tâche de dessin effectuée dans l'obscurité, le fait de voir la figure à reproduire tout au long de l'exécution améliore la reproduction des caractéristiques extrinsèques et intrinsèques. Ces types de caractéristiques réfèrent respectivement à l'orientation des arrêtes et à la forme de la figure (Guerraz et al., 2011). Toutefois, dans ces mêmes conditions de vision, un biais dans la représentation interne de la configuration du corps existe toujours. Les mêmes auteurs mentionnent que l'avantage procuré par la vision de la figure est de courte durée, car celui-ci disparaissait lorsque les sujets devaient fermer les yeux avant de commencer à dessiner. La vision de la figure permettrait la représentation de la tâche dans un référentiel exocentrique stable, ce qui ne serait pas possible en son absence (Bridgeman & Stark, 1991, Paillard, 1991; Blouin et al., 1993).

En guise de synthèse, les informations afférentes sont acquises tout au long du mouvement, que ce soit par la vision périphérique ou par la vision centrale. La vision étant une ressource précieuse et limitée, elle est redirigée constamment vers la source d'information la plus importante. Les informations proprioceptives, rétinienne et extra-rétinienne sont utilisées afin de planifier puis d'apporter des corrections au mouvement choisi. Ces signaux permettent de représenter le mouvement dans des référentiels égocentriques ou exocentriques. La précision de ces perceptions de l'orientation du corps dans l'espace est modifiée en fonction de la position des différents segments. Une rotation de la tête selon l'axe longitudinal du tronc influence ainsi la reproduction d'une figure dans l'obscurité. En conséquence, une question demeure : comment les mouvements des yeux, de la tête et de la main sont-ils coordonnés afin de profiter au maximum des informations sensorielles?

## 2.3 Coordination des yeux, de la tête et de la main

### 2.3.1 Coordination des mouvements de la tête et des yeux lors de saccades oeil-tête

Bien que les mouvements des yeux et de la tête soient utilisés pour recueillir des informations tout au long de nos activités quotidiennes, cette cueillette d'information se fait rarement avec un seul de ces deux segments. Nous allons présenter les données sur la coordination entre la tête et les yeux lors de saccades oeil-tête. Ensuite, nous examinerons cette coordination en ajoutant la main lors de tâches discrètes et finalement lors de mouvements répétitifs. Afin de déterminer l'orientation de l'axe du regard lors de saccades oeil-tête, il faut non seulement tenir compte de la position des yeux dans l'orbite mais aussi de celle de la tête sur le tronc et de l'orientation du tronc dans l'espace. Les mouvements de la tête et des yeux sont interchangeables. Toutefois, ceux de la tête seraient préférés lorsque des déplacements oculaires sont indésirables ou impossibles (Gaymard et al., 2000). Lors de saccades de grandes amplitudes, la tête semble compenser pour la rotation du tronc par le réflexe vestibulo-colique de la même manière que les yeux compensent pour la rotation de la tête par le réflexe vestibulo-oculaire (Land, 2004).

Les mouvements de la tête sont composés d'une phase d'accélération, suivie d'une phase de décélération comprenant de multiples corrections, celles-ci augmentent l'amplitude finale de la rotation (Kim et al., 2007). Autrement dit, la composante initiale des mouvements de la tête sous-estime l'excentricité de la cible à atteindre, les modifications de la trajectoire qui suivent permettent d'atteindre la position souhaitée. En l'absence de la position exacte de la cible, la première phase de ce mouvement servirait à transporter la tête jusqu'à une position où l'oeil pourra fovéaliser la cible (Kim et al., 2007). Lorsque la cible est fovéalisée, sa position peut être estimée précisément et ainsi des boucles de corrections sur la base de signaux visuels (?), proprioceptifs et vestibulaires peuvent amener la tête à une position désirée pour l'excentricité de la cible en question (Freedman & Sparks, 2000). Cette stratégie a l'avantage d'éviter de produire des mouvements de la tête rapides et de grande amplitude qui sont coûteux en énergie comparativement à de plus petits mouvements qui sont allongés par la suite (Kim et al., 2007). Les auteurs suggèrent aussi que les sous-mouvements pourraient augmenter la précision de la représentation de l'orientation de la tête en permettant des évaluations successives de l'état du système tête/cou à chaque sous-mouvement. Toutefois, Rossetti et collaborateurs (1994) suggèrent que les déplacements de la tête après la fovéalisation de la cible permettent le retour de l'oeil dans sa zone de travail optimale afin d'augmenter la précision de la localisation spatiale. Cette hypothèse explique en partie les grandes variations de contribution du mouvement de la tête à l'amplitude totale de la saccade oeil-tête. Des valeurs de cette mesure (amplitude de la tête/amplitude de la saccade oeil-tête) de 0% sont rapportées pour des déplacements de moins de 10 degrés de l'axe du regard, faisant contraste avec des valeurs atteignant 72% pour de plus grandes amplitudes parcourues (Kim, 2005). Il est à noter qu'il existe de grandes variations inter-individus sur ce paramètre (Kim, 2005, Bard et al., 1992).

### **2.3.2 Coordination des mouvements de la tête, des yeux et de la main lors de tâches discrètes**

La plupart de nos activités quotidiennes nécessitent non seulement des saccades oeil-tête mais aussi des mouvements focaux de nature discrète ou répétitive. Historiquement, la coordination entre l'oeil, la tête et la main a été très débattue. Les latences de départ ou d'arrivée sont des mesures permettant de déterminer cette coordination. La latence de départ oeil-main est calculée par la différence entre le temps où le départ de l'oeil s'est produit et celui de la main, le même principe est utilisé afin de calculer les latences d'arrivée ou les latences entre d'autres segments. Il est donc possible de calculer des latences oeil-tête, oeil-main ou tête-main pour le départ et pour l'arrivée.

En 1986, Jeannerod rapportait que la saccade oculaire débutait toujours avant le mouvement de la tête et de la main. Toutefois, le même auteur note qu'une augmentation de l'excentricité de la cible réduisait la latence oeil-tête. Dans cette étude, bien que certaines latences de départ et d'arrivée varient, les ordres de départ et d'arrivée sont identiques, soit l'oeil en premier, suivi de la tête, puis de la main. L'auteur a donc suggéré que les paramètres contrôlés du mouvement étaient les ordres de départ et d'arrivée des différents segments (Jeannerod, 1986). Cette proposition contraste avec les résultats de Carnahan et Marteniuk (1991), qui indiquent que l'ordre de départ de l'oeil, la tête et la main changeait en fonction des instructions et de l'excentricité de la cible. Leurs sujets devaient pointer le plus rapidement ou le plus précisément possible une cible située à 26 ou 43 degrés de la ligne médiane. Ils proposent que l'ordre d'arrivée soit le paramètre contrôlé du mouvement car il restait identique pour toutes les conditions (Carnahan & Marteniuk, 1991). Il est important de noter que les sujets devaient faire une rotation de la tête jusqu'à la cible dans l'étude de Carnahan et Marteniuk, ceci pourrait expliquer pourquoi l'ordre d'arrivée n'a pas été affecté par les instructions ou l'excentricité des cibles.

Certains auteurs mentionnent que la précision d'un pointage est réduite lorsque la tête est immobilisée (Biguer et al., 1984, Rossetti et al., 1994), mais cette observation pourrait être limitée au « *head movers* » (Bard et al., 1992). En effet, ces auteurs ont séparé leurs sujets en deux groupes selon l'amplitude du mouvement de la tête pour une saccade oeil-tête de 30 degrés. Si cette amplitude dépassait 7 degrés, ils étaient classés comme « *head movers* », sinon ils appartenaient au groupe des « *non head movers* ». Leurs résultats montrent que les différences inter-individus dans l'utilisation de la tête affectent la précision de pointages. En utilisant plusieurs combinaisons de position des yeux et de la tête durant une tâche de pointage, Rossetti et collaborateurs (1994) suggèrent que l'erreur de localisation spatiale causée par une rotation des yeux est plus grande que lorsque la même amplitude est couverte par la tête. Ainsi, après la fovéalisation de la cible, aucune amélioration de la position du regard n'est obtenue jusqu'à la fin du mouvement de la tête. La complétion de ce mouvement peut donc sembler inutile. Toutefois, les auteurs proposent qu'une augmentation

de la précision de la localisation spatiale survienne après la fovéalisation de la cible, car le mouvement de la tête permet le retour de l'oeil dans sa zone de travail optimale. Par contre, certains auteurs n'ont pas trouvé d'amélioration de la précision du pointage en présence de mouvements de la tête (Vercher et al., 1994). Les mêmes auteurs constatent que la tête se déplace moins rapidement lors de pointages que lors de saccades oeil-tête pour une même amplitude parcourue. De plus, ils observent que les temps de terminaison du mouvement, soit le temps de réaction additionné au temps de mouvement, sont hautement corrélés. Les auteurs proposent que ce ralentissement de la tête lors des pointages serve à ce que la main, la tête, et donc l'oeil dans l'orbite, terminent leurs mouvements en même temps. Ils introduisent d'ailleurs l'expression de couplage entre la tête et la main. Ainsi, la synchronisation de la fin du mouvement pour tous les segments serait le paramètre contrôlé par le système nerveux central, ce qui est en contradiction avec les résultats de Carnahan et Marteniuk (1991) qui remarquaient des latences entre l'oeil, la tête et la main. Toutefois, les différences méthodologiques entre ces deux études pourraient expliquer le désaccord entre les résultats de ces auteurs. Dans l'étude de Vercher et collaborateurs, les temps de mouvements de la main sont jusqu'à 150ms plus lents, soit 45% plus long que dans celle de Carnahan et Marteniuk. Ainsi, les sujets pourraient avoir adopté un patron de coordination pour la production de mouvements plus lents.

Bien que la coordination entre l'oeil, la tête et la main ait été étudiée quelques fois pour des pointages discrets, c'est la coordination entre l'oeil et la main qui a reçu le plus d'attention. Plusieurs séquences de départs sont rapportées, le regard arrive sur la cible parfois au moment où la main débute son mouvement (Goodale, 1996, Prablanc et Martin, 1992) et parfois à l'atteinte du pic d'accélération (Helsen et al., 1998, 2000) ou de vitesse (Abrams et al., 1990, Feys et al., 2005) de l'effecteur distal. Lorsque la cible est fovéalisée, elle le reste jusqu'à la fin du mouvement de la main, ceci est qualifié de phénomène d'ancrage du regard sur la cible. La reproduction de ce patron de coordination suggère qu'il offre un compromis vitesse/précision optimal pour la production de pointages.

### **2.3.3 Coordination des yeux et de la main lors de tâches répétitives**

La plupart des études mentionnées jusqu'à présent portaient sur des tâches discrètes, toutefois une certaine proportion de nos activités quotidiennes est constituée de tâches cycliques ou répétitives. Un débat est en cours sur la nature des unités d'action lors des tâches discrètes et répétitives. Des auteurs suggèrent que lors de pointages réciproques, la phase de décélération est conjointe à la phase d'accélération du mouvement suivant (Guiard, 1993, 1997). Ainsi, une seule activation musculaire permettrait de ralentir et d'accélérer à nouveau l'effecteur. L'avantage de cette stratégie serait de profiter du retour d'énergie élastique des muscles. Cette cinématique du mouvement est qualifiée d'harmonique. L'auteur suggère que cette organisation ne peut être décomposée en unité discrète (Guiard, 1993). Toutefois, il faut noter que les

pointages réciproques ne sont pas toujours harmoniques, tel est le cas lorsque les contraintes de précision sont élevées (Guiard, 1997, Buchanan et al., 2006).

Peu d'auteurs ont porté leur regard sur la coordination entre l'oeil et la main lors de pointages réciproques. Dans ce type de tâche, la vision doit à la fois aider à compléter le mouvement en cours et préparer le prochain mouvement (Lazzari et al., 2009). Ainsi, un compromis doit être fait entre le contrôle visuel de la dernière phase du mouvement présent et l'avance de l'oeil sur la main lors du prochain mouvement. Ces auteurs suggèrent que deux modes de contrôles existent pour les pointages réciproques. Un premier basé principalement sur les informations visuelles lorsque l'indice de difficulté est élevé et que le temps de mouvement permet l'exécution de saccades oculaires. L'autre utiliserait surtout les informations proprioceptives lorsque le temps de mouvement est court et que la vitesse de l'effecteur est élevée.

Terrier et collaborateurs (2011) notent que la latence de départ oeil-main n'est pas modifiée par l'indice de difficulté lors de pointages discrets contrairement à leurs équivalents réciproques. Leurs résultats indiquent que le départ de l'oeil s'effectue environ 145ms avant celui de la main pour des indices de difficulté de 3.7 à 6.7 bits lors de pointages discrets. Cette latence de départ oeil-main est considérablement réduite lors de pointages réciproques, de plus une augmentation de l'indice de difficulté vient réduire davantage celle-ci. Ainsi, à un indice de difficulté de 6.7 bits, l'avance de l'oeil sur la main est quasiment abolie. Le patron de coordination oeil-main observé par ces auteurs, permet de suggérer que même à des indices de difficulté élevés, les pointages réciproques ne sont pas une concaténation d'unités discrètes. De plus, le temps de contact avec la cible, soit l'intervalle entre deux mouvements, augmente avec l'indice de difficulté (Adam et al., 1995, Adam & Paas, 1996, Buchanan et al., 2003, 2006, Terrier et al., 2011).

En résumé, l'amplitude du mouvement couverte par la tête est réduite par rapport à l'étendue parcourue par le regard. Des patrons de coordination œil-main différents apparaissent lors de pointages discrets et réciproques. Lorsqu'un seul pointage est effectué, il semble que l'œil débute son mouvement en avance par rapport à celui de la main. Par la suite, le regard reste ancré sur la cible jusqu'à l'arrivée de la main. Pendant des pointages réciproques, l'avance de l'œil sur la main est considérablement réduite au début du mouvement, de plus celle-ci est diminuée davantage par l'augmentation des contraintes de précision.

#### **2.3.4 Problématique**

Beaucoup d'études ont observé la coordination entre l'œil et la main lors de tâches discrètes. Le patron de coordination semble être assez stéréotypé, l'œil débute son mouvement puis la main commence à se diriger vers la cible. L'ancrage du regard sur la cible est maintenu jusqu'à la fin du mouvement. Les résultats de Terrier et collaborateurs (2011) montrent une modification de la coordination entre l'œil et la main lorsque la tâche est réciproque plutôt que discrète. Certaines études ont examiné la coordination entre l'œil, la

tête et la main. Cependant, il n'y a pas de consensus sur le patron de coordination qui est mis en place lors de tâches discrètes. De plus, à notre connaissance, aucune étude n'a observé la coordination entre la tête et la main lors de tâches répétitives. La coordination entre l'oeil et la main est adaptée avec finesse en fonction de l'indice de difficulté lors de pointages réciproques. Comme les yeux et la tête sont intimement liés, il est possible que l'adaptation de la coordination oeil-main influence celle entre la tête et la main.

La présente étude a pour but de vérifier si la coordination temporelle entre la tête et la main reste constante lors de pointages discrets et réciproques nécessitant différents niveaux de précision. Si un couplage existe entre la tête et la main effectrice, comme suggéré par Vercher et collaborateurs (1994), une augmentation de l'indice de difficulté de la tâche devrait mener à des augmentations similaires du temps de mouvement de la tête et de la main. Rossetti et collaborateurs (1994) proposent qu'une augmentation de la précision de la localisation spatiale survienne après la fovéalisation de la cible lorsque la tête effectue une rotation afin de ramener l'œil dans sa zone de travail optimale. Ainsi, une augmentation des contraintes de précision pourrait augmenter l'amplitude des mouvements de la tête afin d'obtenir une meilleure localisation spatiale de la cible. Nos hypothèses sont que pour les deux tâches, donc pointages discrets et réciproques, la latence tête-main à l'arrivée sera nulle pour tous les indices de difficulté. De plus, l'amplitude parcourue par la tête augmentera avec l'indice de difficulté, et ce, pour les deux types de pointages.

# 3 – HAND-HEAD COORDINATION CHANGES FROM DISCRETE TO RECIPROCAL HAND MOVEMENTS FOR VARIOUS DIFFICULTY SETTINGS

Mathieu Germain-Robitaille <sup>a</sup>

Romain Terrier <sup>b</sup>

Nicolas Forestier <sup>b</sup>

Normand Teasdale <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Groupe de Recherche en Analyse du Mouvement et Ergonomie, Division de Kinésiologie, Département de Médecine Sociale et Préventive, Faculté de Médecine, Université Laval, Québec (Québec), G1K 7P4, Canada.

<sup>b</sup>Laboratoire de Physiologie de l'Exercice (E.A. 4338), Département STAPS, UFR CISM, Université de Savoie, 73376 Le Bourget du lac cedex, France

Cet article a été publié dans la revue Neuroscience Letters le 11 juillet 2012.

### 3.1 Résumé

Les paramètres qui dictent la coordination temporelle entre la tête et la main sont encore débattus. La coordination temporelle entre la tête et la main a déjà été étudiée lors de pointages discrets de différentes amplitudes. La présente étude examine l'effet de la nature (discrète vs réciproque) et de la difficulté (ID) de la tâche sur la coordination temporelle entre la tête et la main lors d'un paradigme semblable à celui de Fitts. De jeunes adultes pointaient une cible (mouvement discret) ou alternativement entre deux cibles (mouvements réciproques). La taille de la cible était modifiée afin d'obtenir des conditions avec des IDs de 4.7, 5.7 et 6.7 bits. Dans le but de mesurer la coordination temporelle entre la tête et la main, des latences tête-main ont été calculées au départ, au pic de vitesse et à l'arrivée de chaque mouvement. Les mouvements de la tête n'étaient pas affectés de quelques manières que ce soit par l'ID durant les pointages discrets. Ce n'était toutefois pas le cas lors des pointages réciproques. Lors de ces derniers, 1) l'amplitude et la durée des mouvements de la tête étaient plus petites que lors des mouvements discrets et 2) l'élévation de l'ID augmentait la durée et l'amplitude des mouvements de la tête. Les latences d'arrivée demeuraient positives (i.e. la main atteignait la cible après l'arrêt de la tête) pour tous les IDs durant les pointages réciproques contrairement aux mouvements discrets. Ainsi, différents patrons de coordination entre la tête et la main ont été observés selon la nature de la tâche et l'ID. Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que la coordination entre la tête et la main n'est pas prédéterminée, elle est plutôt ajustée aux contraintes de la tâche à réaliser.

## 3.2 Abstract

The parameters dictating the temporal hand-head coordination during visually corrected movements remain elusive. Previous studies have analyzed the temporal hand-head coordination during discrete movements of various amplitudes. Here we examine the effects of the nature (discrete vs reciprocal) and the difficulty (ID) of the task on the temporal hand-head coordination during a Fitts' like paradigm. Young adults aimed at a single target (discrete movement) or alternately to two targets (reciprocal movements). Target size varied to produce conditions with IDs of 4.7, 5.7 and 6.7 bits. To measure the temporal hand-head coordination, hand-head latencies were calculated at the onset, peak speed and offset of each movement. Head movements were unaffected in any way by the ID during discrete movements. This was not the case during reciprocal movements where head movements were 1) smaller in duration and amplitude than during discrete movements and 2) increased in duration and amplitude with an increasing ID. Offset latencies remained positive (i.e. the hand reached the target after the head stopped) for all IDs during reciprocal but not during discrete movements. Altogether, different patterns of temporal hand-head coordination were observed between discrete and reciprocal movements as well as between IDs, suggesting the hand-head coordination does not follow a fixed rule but is adjusted to task requirements.

**Keywords:** hand, head, coordination, reciprocal, pointing, difficulty

### 3.3 Introduction

Fitts' law [6], which describes the relationship between movement time and task difficulty, is one of the most robust relationships in the field of motor control. It states that the time needed to point to a target as fast and as accurately as possible increases linearly with an index of difficulty defined as the  $\text{Log}_2(2A/W)$  where  $A$  is the amplitude of the movement and  $W$  is the width of the target. Fitts' law has been verified for different contexts and for many tasks (for a review, see Plamondon & Alimi [14]). For some experiments, the head has been used as the effector for pointing movements, either by extension with a laser pointer [5,8] or through a computer input device (e.g., when using a head tracker for moving a pointer on a screen) [12,13]. Generally, however, the head is the moving base of the visual and vestibular sensors for other effectors such as the finger, the wrist or the arm [7,10] and in some rare cases the foot [2].

Using a discrete pointing task, Biguer et al. [3] observed that the amplitude of the head never exceeded  $2/3$  of the distance separating two targets. These authors were also the first to report that immobilizing the head reduces pointing accuracy for target eccentricity over  $30^\circ$ . Similar results were obtained by Bard et al. [1] for their *head movers* group in contrast with their *non head movers* group whose accuracy remained unaffected by target eccentricity up to  $45^\circ$ . In line with these observations, Rossetti et al. [15] showed that, for various target eccentricities, hand pointing variability was reduced when head movements, rather than eye movements, contributed to localizing the target. Presumably, head movements improve spatial localization accuracy by allowing the eyes to come back to their optimal working zone once the initial saccade is completed [15]. Interestingly, when movements of the pointing hand and of the head are made following a signal to move as rapidly and as accurately as possible, the head slows down compared to normal eye-head saccades (without hand pointing) to a target of similar amplitude. Presumably, this slowing of the head serves to synchronize the head and hand movement termination times [17]. These authors suggested the head is the 'slave' of a sensorimotor coordination process, implying the presence of a coupling between the hand effector and the head. More precisely, Vercher et al. [17] showed that, for different target eccentricities, head and hand movement times were roughly correlated whereas termination times (reaction time + movement time) were highly correlated.

The above observations apply for discrete pointings. A special coordination feature appears in reciprocal movements (that is, when pointing alternately to two targets). In this case, visual information is required both to bring the movement in progress to a successful conclusion and to prepare the next movement [11]. Compared to discrete movements where a robust gaze-hand coordination pattern is observed with the gaze leading the hand by about  $145\text{ ms}$ , the magnitude of the starting gaze-hand lead pattern for reciprocal movements 1) was smaller, 2) decreased with an increasing ID, and 3) was nearly abolished for the higher ID [16].

Fitts' law holds when the head is the effector for pointing at a target (e.g., through a laser pointer or head tracker moving a pointer on a screen) [12,13]. The aim of this study is to examine if the hand-head temporal coordination remains constant for discrete and reciprocal hand movements of varying difficulties. A tight coupling between the head and the pointing hand should lead to similar changes in movement time for both the head and hand for various IDs. We hypothesize that, for both tasks (discrete and reciprocal movements), 1) the head and hand termination time will be synchronized for all IDs, 2) the head amplitude will increase with an increasing ID.

### 3.4 Methods

Two groups of subjects participated in a Fitts' like experiment with discrete or reciprocal hand movements. Six right handed males (mean age:  $27 \pm 3.8$  yrs, mean height:  $181 \pm 5.5$  cm, and mean weight:  $77 \pm 9.2$  kg) took part in the discrete movement experiment and 12 right handed males (mean age:  $25.2 \pm 4.7$  yrs, mean height:  $179.6 \pm 6.5$  cm, and mean weight:  $75.6 \pm 8.2$  kg) took part in the reciprocal movement experiment. All subjects were without any history of joint or neuromuscular disease and naïve as to the specific purposes of the experiments. They all gave their written informed consent to participate on a voluntary basis in these experiments, which was approved by the local IRB.

Participants were seated in front of a vertical board with two aluminum circular targets (figure 1). The distance between subjects' forehead and the board was approximately 60 cm. The centre of the lower target (T1) was about at the height corresponding to the subjects' inter-acromial line. The upper target (T2) was shifted 35 cm to the right and to the top leading to a 50-cm amplitude (A) between targets. The horizontal and vertical amplitudes of gaze displacements necessary to focus on each target's centre were about  $32^\circ$ . A Fitts-like paradigm [6] was used with three pairs of targets (diameter (D) of 3.8, 1.9 and 0.95 cm; thickness: 2.5 cm). This setup allowed indices of difficulty ( $ID = \log_2[2A/W]$ ) of 4.7, 5.7 and 6.7 bits. Movements were made with a stylus having a 1-mm tip. The targets and the stylus were electrically connected allowing detection of target contacts. This voltage signal was recorded at 1200 Hz (12-bit A/D conversion) and was used to determine the start and the end of each movement. Moreover, the 3D kinematics of the tip of the stylus was sampled at 120 Hz by means of a magnetic receiver (Polhemus™ Liberty). Another magnetic tracker (Flock of Birds Ascension Technology) allowed recording the head position and orientation in space.

All data (target contacts, kinematics of the stylus and head) were synchronized on the external sync TTL signal of the Polhemus Liberty by means of a microcontroller (Parallax, Basic Stamp).

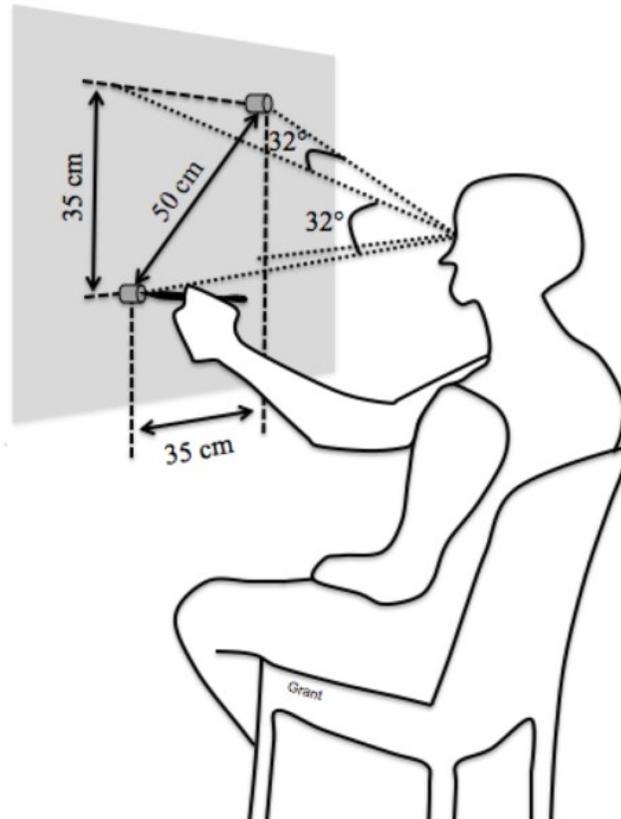


Figure 1. Schematic of the experimental setup

For each experiment (discrete, reciprocal), the task was to point at the targets as quickly and as accurately as possible. For discrete movements, subjects performed a block of ten trials from the lower (T1) to the upper (T2) target. They were not allowed more than 2 errors per block. When this occurred, a new condition (ID) was presented and the complete block of 10 trials was presented again at the end of the session. For reciprocal movements, the task was to alternately point at the targets for 25 seconds. As the error level cannot easily be controlled online during this task, a ratio of unsuccessful/successful contacts was calculated a posteriori for each ID. The targets' thickness (2.5 cm) precluded subjects from gliding with the stylus from the vertical board to the target. Before data recording, subjects practiced the task until they felt comfortable and efficient for the different IDs. During data recording, the order of presentation of the IDs was randomized between subjects. Each trial started with the stylus and the point of gaze on the lower target. To prevent fatigue, a short rest was allowed between trials and target conditions.

The duration between the end of a target contact and the start of another one was defined as the hand movement time (MT). All trials were visually inspected by comparing contact signals to hand displacement signals. When a hand reversal displacement (as observed from the displacement signals recorded from the magnetic tracker) was not associated with a target contact, the movement was considered

as unsuccessful. To determine pointing accuracy, the ratio of unsuccessful movements (without target contact) to the total number of movements was calculated. For reciprocal movements, the contact time (CT), defined as the time between the onset and the end of the same target contact, was also computed.

Position data from the stylus were filtered (Butterworth fourth-order with a 7 Hz low pass cut-off frequency with dual-pass to remove phase shift) prior to calculation of the hand resultant velocity (finite-difference algorithm). Peak speeds were determined with custom software developed in Matlab™. The duration between the onset of a movement and its peak speed was defined as the duration of the acceleration phase while the time between the peak speed and the end of the movement was defined as the duration of the deceleration phase. Azimuth data (angular position in the transverse plane) from the head were used to calculate head movement onset, offset and amplitude. A velocity criterion of 4°/s was used. Velocity peaks, and the duration of the acceleration and deceleration phases were determined in the same way as for the hand. For reciprocal movements, the head pausing time was calculated as the time between offset of a head movement and the onset of the next movement. The ONSET latency defined as the difference between the onset of the hand displacement and that of the head was calculated as follows:

**ONSET latency=onset of the hand-onset of the head**

The OFFSET latency was calculated in the same way using the offset of the movement:

**OFFSET latency=offset of the hand-offset of the head**

For these two variables, a positive value indicates the hand started (ONSET) or finished (OFFSET) its movement after the head. Therefore a negative value means the hand departed from (ONSET) or arrived on (OFFSET) target first. Peak speed latency was also calculated in the same manner:

**PEAK SPEED latency=time at hand peak velocity-time at head peak velocity**

For each experiment (discrete, reciprocal), dependent variables were submitted to one-way repeated measures ANOVA (3 IDs). When significant, the main effect of ID was tested for its linear trend. A 0.05 alpha threshold was adopted throughout.

### 3.5 Results

Overall, for discrete movements, 14 errors were recorded and only 2 blocks were retaken. No effect of ID was present. Similarly, in reciprocal movements, no effect of ID was observed for the ratio of unsuccessful pointings (on average, 5.7%).

Table 1 presents data for both types of movements and results from the ANOVAs. For both reciprocal and discrete movements, the main effect of ID was significant for all hand variables analyzed. For discrete movements, hand MT, duration of the hand acceleration and deceleration phases all increased linearly with an increasing ID ( $F(1,5)=94.12$ ,  $9.61$  and  $88.39$ , respectively;  $ps<0.05$ ). As well, peak speed for the hand

decreased linearly with an increasing ID ( $F(1,5)=11.12$ ,  $p<0.05$ ). Similar results were obtained for reciprocal movements ( $F(1,11)=142.40$ ,  $100.28$ , and  $136.77$ , for the hand MT, duration of the hand acceleration and deceleration phases, respectively;  $ps<0.01$ ). Peak speed decreased linearly with an increasing ID ( $F(1,11)=111.15$ ,  $p<0.01$ ) during reciprocal movements. Target contact time increased linearly with an increasing ID ( $F(1,11) = 12.14$ ,  $p < 0.01$  in reciprocal movements) but this increase was relatively small averaging only 20ms from the lowest to the highest ID. These results indicate MT followed Fitt's law for both discrete and reciprocal movements.

		ID						F	
		4.7 bits		5.7 bits		6.7 bits		hand	head
		hand	head	hand	head	hand	head		
Movement Time (ms)	DP	336(±15)	365(±41)	513(±19)	352(±41)	652(±28)	350(±30)	76.313 <sup>a</sup>	0.41
	RP	377(±16)	215(±14)	511(±19)	276(±15)	706(±32)	325(±19)	106.24 <sup>a</sup>	68.67 <sup>a</sup>
Acceleration Time (ms)	DP	115(±4)	104(±7)	134(±5)	100(±4)	135(±6)	104(±6)	8.28 <sup>a</sup>	0.20
	RP	160(±8)	92(±3)	200(±8)	106(±3)	236(±9)	122(±6)	81.77 <sup>a</sup>	28.42 <sup>a</sup>
Deceleration Time (ms)	DP	221(±12)	261(±45)	379(±20)	252(±43)	517(±29)	246(±27)	67.54 <sup>a</sup>	0.31
	RP	217(±11)	123(±12)	311(±14)	169(±12)	470(±26)	203(±13)	97.83 <sup>a</sup>	53.34 <sup>a</sup>
Contact/Pausing Time (ms)	RP	54(±3)	215(±23)	65(±5)	301(±30)	74(±6)	464(±43)	12.14 <sup>a</sup>	44.56 <sup>a</sup>
Peak Speed(m/s or deg/s)	DP	2.57(±0.07)	52.4(±12.5)	2.27(±0.05)	57.4(±13.3)	2.21(±0.05)	55.4(±13.1)	10.23 <sup>a</sup>	0.77
	RP	2.28(±0.06)	45.6(±8.3)	2.02(±0.05)	47.0(±6.7)	1.89(±0.05)	47.2(±5.1)	67.62 <sup>a</sup>	0.13
Amplitude(deg)	DP	-	7.3(±1.6)	-	7.8(±1.7)	-	7.6(±1.6)	-	0.39
	RP	-	5.6(±1.1)	-	6.6(±1.1)	-	7.3(±0.9)	-	7.97 <sup>a</sup>
Onset latency (ms)	DP	-88(±26)		-87(±23)		-102(±28)		1.78	
	RP	-81(±18)		-81(±18)		-84(±18)		0.05	
Peak speed latency (ms)	DP	-78(±34)		-65(±31)		-75(±28)		0.64	
	RP	-13(±17)		12(±18)		31(±15)		12.69 <sup>a</sup>	
Offset latency (ms)	DP	-117(±19)		74(±32)		200(±32)		78.00 <sup>a</sup>	
	RP	81(±16)		154(±21)		298(±30)		56.62 <sup>a</sup>	

<sup>a</sup>  $p<0.01$

Table 1. Characteristics of the movement for the discrete (DP) and reciprocal movements (RP). The F columns show the F statistic for the main effect of ID. When significant, the linear trend between ID and the variable was tested. F values for the linear trend are presented in the results section.

For the head, MT, duration of the acceleration and deceleration phases, amplitude of the movement and peak speed did not vary with the ID for the discrete movements ( $ps > 0.05$ ). For reciprocal movements, head MT increased linearly with an increasing ID ( $F(1,11) = 193.53$ ,  $p < 0.01$ ). The duration of the acceleration and deceleration phases increased with an increasing ID ( $F(1,11) = 40.86$ ,  $242.51$ ,  $ps<0.01$  for the linear trend of the duration of head acceleration and deceleration phase, respectively). Peak speed was not altered with the ID ( $p > 0.05$ ) but the amplitude of the head movement increased linearly with an increasing ID ( $F(1,11) = 7.97$ ,  $p < 0.01$ ). Finally, the head pausing time increased linearly with an increasing ID ( $F(1,11)=15.69$ ,  $p < 0.01$ ).

Overall, these results show that for discrete movements, the hand followed Fitts' law while this was not the case for the head for which constant movement times and constant amplitude were observed across all

ID. For reciprocal movements, however, both the movement time for the hand and the head increased linearly with an increasing ID. Figure 2 illustrates these results.

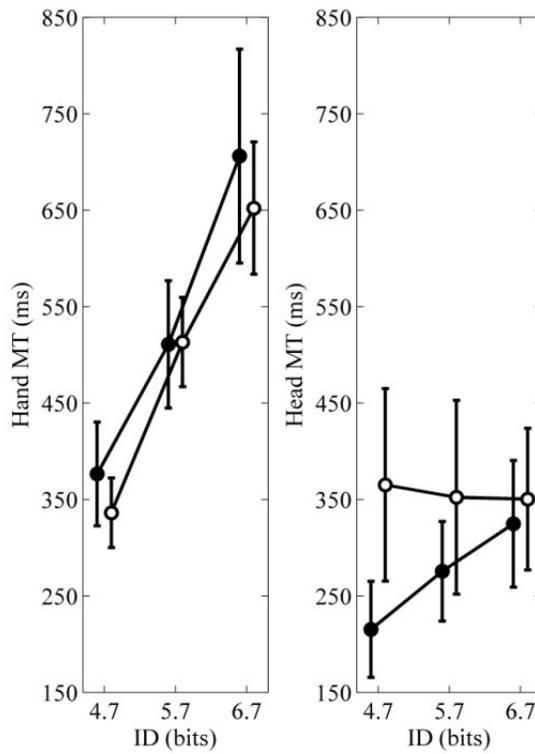


Figure 2. Hand and head movement times. Open symbols represent discrete movements while filled symbols represent reciprocal movements.

The key question asked in this study concerned the coordination between the hand and head for both types of movements. To examine this aspect, hand-head onset, offset and peak speed latencies were analyzed. Figure 3 presents mean results.

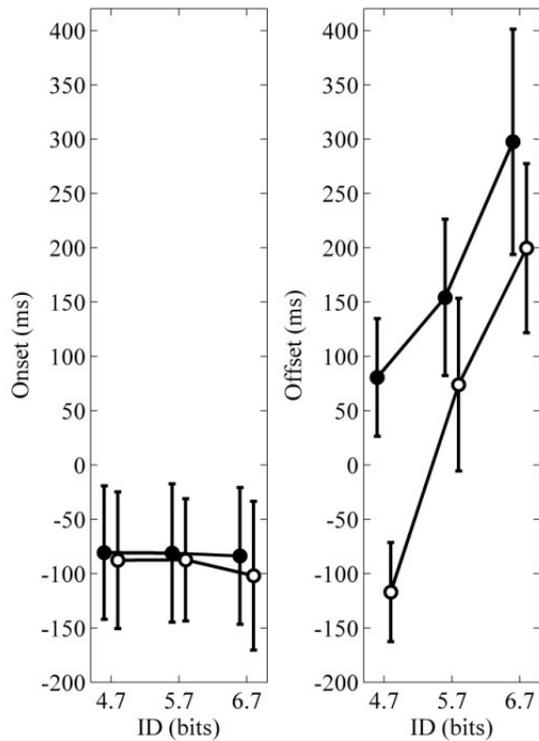


Figure 3. Onset and offset latencies. Open symbols represent discrete movements while filled symbols represent reciprocal movements. Negative values indicate the hand started (Onset) or finished (Offset) the movement before the head. Positive values indicate the reverse.

For discrete movements, the onset latency remained unaffected by the ID ( $F(2,10)=1.78, p>0.05$ ). On average, the hand lead the head by 92 ms. Peak speed latency also remained unaffected by ID ( $F(2,10) = 0.64, p>0.05$ ), and on average the hand still lead the head by 73 ms. The offset latency, however, increased significantly with an increasing ID ( $F(2,10)=78.00, p<0.01$ ), averaging -117, 74 and 200 ms for the lowest to highest ID, respectively. Therefore, for the lowest ID (4.7 bits), the hand reached the target while the head continued to move for 117 ms. On the other hand, for the higher IDs, the hand was still moving toward the target when the head had stopped.

During reciprocal movements, the onset latency remained constant across the ID ( $F(2,22)=0.05, p>0.05$ ) with the hand leading the head by 82 ms. Hence, as for discrete movements, the hand always started moving before the head did. Peak speed latency increased with an increasing ID ( $F(2,22)=12.69, p<0.05$ ), averaging -13, 12 and 31 ms for the lowest to the highest ID, respectively. These values show the hand reached its peak speed before the head only for the lowest ID; for the two higher IDs, the hand reached its peak speed after the head. A significant effect of ID was noted for the offset latency ( $F(2,22)=56.62, p<0.01$ ),

average values were 81, 154, 298 ms for ID of 4.7, 5.7, 6.7 bits respectively. Hence, for all IDs, the hand was still moving when the head had stopped.

### 3.6 Discussion

This study examined if the hand-head temporal coordination remains constant for discrete and reciprocal hand movements of varying difficulties. The percentage of unsuccessful movements remained relatively low and hand movement times increased linearly with an increasing ID for both type of movements. This suggests that subjects followed the instructions to point as fast and as accurately as possible to the target (or between the two targets for reciprocal movements).

Vercher et al. [17] observed, while varying the amplitude of the hand movement, a coupling of hand and head. Across movement amplitudes (and presumably IDs), they observed the completion times residuals (offset latencies in our study) were negligible and constant. They argued this parameter might be the controlled variable for discrete movements. To follow this suggestion, both the hand and head movements should vary with the ID so as to keep constant the offset latency. In the present study, during discrete movements, head movements were not modified in any way by an increase in the accuracy constraints. Since hand movement times increased, we observed a linear increase in the offset latency. These observations oppose the suggestion that termination time is the controlled variable when discrete movements have specific accuracy constraints as in a Fitts' task. Therefore, our first hypothesis is not supported, the termination times are not synchronized for all IDs and for discrete and reciprocal movements. As often suggested, accuracy constraints may require both a feedforward and a feedback control and this may be the case not only for the hand but also for the head which role is to allow purposeful gaze displacements [9].

During reciprocal movements a different story unfolds. Head movements are always shorter in duration and amplitude than during the discrete task and both the duration and amplitude of the head movement increased with an increase in the accuracy constraints (i.e., increasing IDs). The scaling of head movement duration and amplitude with the ID indicates an adaptation to accuracy requirements (cf., figure 2), which is not present during discrete movements.

Head movements amplitude values of up to  $2/3$  of the distance between targets have already been reported in head free condition [3]. In our experiment, this parameter never exceeded  $1/4$  of the hand movement amplitude. As a result, the final eye position during head pausing time was always eccentric. Rossetti et al. [15] suggested that by moving the head, subjects increase spatial localization by keeping the eye in its optimal working zone. In line with this proposition, head movement amplitudes increased when the accuracy requirements increased during the reciprocal task. Conversely, in discrete movements, head amplitudes were longer than for reciprocal movements but remained unaffected by accuracy constraints. This observation

invalidates our second hypothesis since the head movement amplitude did not increase with an increasing ID during discrete movements.

During reciprocal movements, the head must be ready for the next movement when the hand reaches the target. Evidently, this requirement is not present during discrete movements and the head stopped after the hand for the lowest ID (4.7bits) which was not the case for the higher IDs. On one hand, longer head movements could provide an increase in spatial localization [15]. On the other hand, stopping the head earlier could provide a stable spatial referential for online terminal corrections when they are necessary (for high IDs). With a Fitts' task, the speed and accuracy requirements may preclude longer head movements because they would induce slower overall hand movement. This was observed by Vercher et al. [17] when slower head movements were noted when a hand pointing movement was executed compared to head-eye movements only. Indeed, having the head and the eyes stabilized in space would increase the accuracy of the transformations of the represented body segment configuration into a joint reference frame. This would probably ease the final phase of correction where visual feedback is essential when accuracy requirements are high.

In our study, onset latency remained negative for all conditions (i.e., the hand started to move before the head), therefore it could be hypothesized that starting main sequence is the controlled variable since no difference was found between discrete and reciprocal pointings. Carnahan & Marteniuk [4] showed that the initiation order, hence onset latencies, of the eyes, head and finger, is affected by instructions and predictability of movement onset during discrete pointing, therefore this hypothesis does not stand during discrete pointing in general.

Despite the hand starting earlier than the head, peak speed of the hand occurred after that of the head for the two higher IDs during reciprocal movements (5.7 and 6.7 bits). This was not observed for discrete movements where peak speed of the hand occurred before that of the head. This suggests that changes in hand-head coordination might start earlier for reciprocal than for discrete movements.

During reciprocal movements, the offset latency has a clear influence on onset latency since the hand and the head must complete their ongoing movement before starting the next one. Reciprocal movements where the hand would reach the target while the head is still moving would lead to an increase in hand contact time and to a smaller number of movements within a constant duration. This would be the case to allow the CNS sufficient time to plan the next movement. This clearly was not the case. To avoid such delays, the CNS reduces head movement amplitudes so that, for each movement, the offset latency stays positive (i.e., the hand reaches the target after the head stops moving). This longer pause duration for the head could reflect not only the requirements for providing a stable referential for the terminal corrections but also the cognitive cost for planning the next movement.

The observed offset latencies suggest no main sequence is optimal during discrete movements, conversely for reciprocal movements the head always 1) started after the hand and 2) stopped before the hand reached the target. Once again, these observations indicate that the head and hand are not coordinated in the same way during discrete and reciprocal movements. These results suggest the hand-head coordination does not follow a fixed rule but that the coordination is adapted to the task's requirements. Hence, as we have proposed in a former paper [16], the present study supports the idea that results obtained by studying discrete tasks are not transferable *de facto* to reciprocal tasks. In real life, however, aiming movements are rarely isolated, therefore it would be important to further the analysis of reciprocal (i.e. not discrete) tasks in motor control studies.

### 3.7 Acknowledgements

Special thanks to Marcel Kaszap for programming and technical expertise and to Grant Handrigan for his help in ironing out language problems. We also thank all the subjects for their cooperation.

### 3.8 References

- [1] C. Bard, M. Fleury, J. Paillard, Different patterns in aiming accuracy for head-movers and non-head-movers, *The head-neck sensory-motor system*, Oxford University Press, Oxford, 1992: p. 582-586.
- [2] M. Bertuccio, P. Cesari, Does movement planning follow Fitts' law? Scaling anticipatory postural adjustments with movement speed and accuracy, *Neuroscience*. 171 (2010) 205-213.
- [3] B. Biguer, C. Prablanc, M. Jeannerod, The contribution of coordinated eye and head movements in hand pointing accuracy, *Exp Brain Res*. 55 (1984) 462-469.
- [4] H. Carnahan, R.G. Marteniuk, The temporal organization of hand, eye, and head movements during reaching and pointing, *J Mot Behav*. 23 (1991) 109-119.
- [5] M. Descarreaux, S.R. Passmore, V. Cantin, Head movement kinematics during rapid aiming task performance in healthy and neck-pain participants: the importance of optimal task difficulty, *Man Ther*. 15 (2010) 445-450.
- [6] P.M. Fitts, The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *J Exp Psych*. 47 (1954) 381-391.
- [7] E.R. Hoffmann, M.C. Hui, Movement times of different arm components, *Ergonomics*. 53 (2010) 979-993.
- [8] R.J. Jagacinski, D.L. Monk, Fitts' Law in two dimensions with hand and head movements, *J Mot Behav*. 17 (1985) 77-95.
- [9] K.H. Kim, R.B. Gillespie, B.J. Martin, Head movement control in visually guided tasks: postural goal and optimality, *Comput. Biol. Med*. 37 (2007) 1009-1019.
- [10] G.D. Langolf, D.B. Chaffin, J.A. Foulke, An investigation of Fitts' Law using a wide

- range of movement amplitudes, *J Mot Behav.* 8 (1976) 113-128.
- [11] S. Lazzari, D. Mottet, J.-L. Vercher, Eye-hand coordination in rhythmical pointing, *J Mot Behav.* 41 (2009) 294-304.
  - [12] S.R. Passmore, J. Burke, J. Lyons, Older adults demonstrate reduced performance in a Fitts' task involving cervical spine movement, *Adapt Phys Activ Q.* 24 (2007) 352-363.
  - [13] S.R. Passmore, J.R. Burke, C. Good, J.L. Lyons, A.S. Dunn, Spinal manipulation impacts cervical spine movement and fitts' task performance: a single-blind randomized before-after trial, *J Manipulative Physiol Ther.* 33 (2010) 189-192.
  - [14] R. Plamondon, A.M. Alimi, Speed/accuracy trade-offs in target-directed movements, *Behav Brain Sci.* 20 (1997) 279-303; discussion 303-349.
  - [15] Y. Rossetti, B. Tadary, C. Prablanc, Optimal contributions of head and eye positions to spatial accuracy in man tested by visually directed pointing, *Exp Brain Res.* 97 (1994) 487-496.
  - [16] R. Terrier, N. Forestier, F. Berrigan, M. Germain-Robitaille, M. Lavallière, N. Teasdale, Effect of terminal accuracy requirements on temporal gaze-hand coordination during fast discrete and reciprocal pointings, *J Neuroeng Rehabil.* 8 (2011) 10.
  - [17] J.L. Vercher, G. Mageses, C. Prablanc, G.M. Gauthier, Eye-head-hand coordination in pointing at visual targets: spatial and temporal analysis, *Exp Brain Res.* 99 (1994) 507-523.

## 4 – CONCLUSION

Le but de cette étude était d'examiner la coordination entre la tête et la main lors de pointages discrets et réciproques avec différentes contraintes de précision. Les contraintes de précision étaient modifiées en fonction de la taille des cibles à atteindre, selon la loi de Fitts (Fitts, 1954). La nature des pointages était également modifiée. Ainsi, durant la condition discrète, les sujets ne devaient exécuter qu'un seul mouvement tandis que, lors des pointages réciproques, ils devaient pointer alternativement entre les deux cibles. Notre première hypothèse était que la tête et la main termineraient leurs mouvements respectifs au même moment, peu importe la condition. La seconde prédisait une augmentation de l'amplitude parcourue par la tête avec l'accroissement des contraintes de précision pour les deux types de pointages.

Les résultats montrent que la coordination entre la tête et la main est adaptée à la nature et la difficulté de la tâche. Toutefois, nos deux hypothèses se sont avérées erronées. La latence tête-main d'arrivée variait considérablement avec l'indice de difficulté pour les deux types de pointages invalidant notre première hypothèse. L'amplitude des mouvements de la tête augmentait avec l'indice de difficulté pour les pointages réciproques, ce qui n'était pas le cas pour la condition discrète. Ainsi, notre deuxième hypothèse ne s'est avérée que partiellement vraie.

Clairement, la coordination entre la tête et la main est adaptée en fonction de la nature des pointages exécutés. Ainsi, comme la tête n'est pas contrainte temporellement lors de pointages discrets, la fin du mouvement de celle-ci pouvait se produire après l'arrivée de la main sur la cible. Lors de pointages réciproques, afin d'obtenir une performance maximale, la tête devait être prête à repartir vers l'autre cible immédiatement après la fin du mouvement de la main. Ainsi, la tête terminait son mouvement alors que la main se dirigeait toujours vers la cible. Cette stratégie pourrait refléter le besoin d'un référentiel spatial stable pour des gestes de haute précision mais aussi le besoin d'une pause afin de débiter la préparation du prochain mouvement. Nos observations ne montrent aucun changement de la latence tête-main au départ selon la nature de la tâche ou les contraintes de précision.

Les contraintes de précision associées à la tâche ont augmenté l'amplitude des mouvements de la tête seulement lors de pointages réciproques. L'amplitude couverte par la tête restait toutefois plus élevée lors de pointages discrets. D'un côté, une augmentation de l'amplitude de la tête pourrait améliorer la précision de la localisation spatiale, de l'autre côté un référentiel stable dans l'espace pourrait faciliter des corrections sur la base d'informations visuelles. Le système nerveux doit effectuer ce compromis durant les tâches réciproques, surtout celles nécessitant de hauts niveaux de précision.

L'exploration des différents compromis effectués lors des tâches réciproques est une avenue de recherche intéressante et trop peu utilisée. Ainsi, l'influence des contraintes posturales et/ou de la fatigue

musculaire sur la coordination œil-tête-main devrait être explorée. Ces deux conditions sont reconnues pour obliger le système nerveux à effectuer des compromis, ce qui présage des résultats attrayants.

Nos résultats s'ajoutent à ceux de Terrier et collaborateurs (2011) pour attester que les observations obtenues lors de tâches discrètes ne s'appliquent pas *de facto* aux tâches réciproques. La coordination entre l'oeil, la tête et la main lors de ces deux types de tâches est différente. Ainsi, comme la plupart des mouvements usuels ne sont pas réalisés indépendamment les uns des autres, mais plutôt de manière séquentielle, plus de recherches devraient être dédiées aux tâches réciproques.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abrams, R. A., Meyer, D. E., & Kornblum, S. (1990). Eye-hand coordination: oculomotor control in rapid aimed limb movements. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 16(2), 248-267.
- Adam, J., Paas, F. G., Eysen, I., Slingerland, H., Bekkering, H., & Drost, M. (1995). The control of two element, reciprocal aiming movements: Evidence for chunking. *Human Movement Science*, 14(1), 1-11.
- Adam, J., & Paas, F. (1996). Dwell time in reciprocal aiming tasks. *Human Movement Science*, 15(1), 1-24.
- Adam, J., Nieuwenstein, J. H., Huys, R., Paas, F. G., Kingma, H., Willems, P., & Werry, M. (2000). Control of rapid aimed hand movements: the one-target advantage. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 26(1), 295-312.
- Bard, C., Fleury, M., & Paillard, J. (1992). Different patterns in aiming accuracy for head-movers and non-head-movers. In A. Berthoz (Ed.), *The Head-Neck Sensory Motor System* (pp. 582-586). Oxford: Oxford University Press.
- Bard, C., Turrell, Y., Fleury, M., Teasdale, N., Lamarre, Y., & Martin, O. (1999). Deafferentation and pointing with visual double-step perturbations. *Experimental Brain Research*. 125(4), 410-416.
- Batista, A. P., Buneo, C. A., Snyder, L. H., & Andersen, R. A. (1999). Reach plans in eye-centered coordinates. *Science*, 285(5425), 257-260.
- Biguer, B., Prablanc, C., & Jeannerod, M. (1984). The contribution of coordinated eye and head movements in hand pointing accuracy. *Experimental Brain Research*. 55(3), 462-469.
- Blouin, J., Gauthier, G. M., & Vercher, J. L. (1995). Internal representation of gaze direction with and without retinal inputs in man. *Neuroscience Letters*, 183(3), 187-189.
- Blouin, J., Okada, T., Wolsley, C., & Bronstein, A. (1998). Encoding target-trunk relative position: cervical versus vestibular contribution. *Experimental Brain Research*. 122(1), 101-107.
- Blouin, J., Teasdale, N., Bard, C., & Fleury, M. (1993). Directional control of rapid arm movements: the role of the kinetic visual feedback system. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 47(4), 678-696.

- Blouin, Jean, Amade, N., Vercher, J.-L., Teasdale, N., & Gauthier, G. M. (2002). Visual signals contribute to the coding of gaze direction. *Experimental Brain Research*, 144(3), 281-292.
- Bock, O. (1993). Localization of objects in the peripheral visual field. *Behavioural Brain Research*, 56(1), 77-84.
- Bridgeman, B., & Stark, L. (1991). Ocular proprioception and efference copy in registering visual direction. *Vision Research*, 31(11), 1903-1913.
- Buchanan, J. J., Park, J.-H., Ryu, Y. U., & Shea, C. H. (2003). Discrete and cyclical units of action in a mixed target pair aiming task. *Experimental Brain Research*, 150(4), 473-489.
- Buchanan, J. J., Park, J.-H., & Shea, C. H. (2006). Target width scaling in a repetitive aiming task: switching between cyclical and discrete units of action. *Experimental Brain Research*, 175(4), 710-725.
- Carlton, L. G. (1981). Processing visual feedback information for movement control. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 7(5), 1019-1030.
- Camahan, H., & Marteniuk, R. G. (1991). The temporal organization of hand, eye, and head movements during reaching and pointing. *Journal of Motor Behavior*, 23(2), 109-119.
- Darling, W. G., Butler, A. J., & Williams, T. E. (1996). Visual perceptions of head-fixed and trunk-fixed anterior/posterior axes. *Experimental Brain Research*, 112(1), 127-134.
- Darling, W. G., & Hondzinski, J. M. (1997). Visual perceptions of vertical and intrinsic longitudinal axes. *Experimental Brain Research*, 116(3), 485-492.
- Darling, W. G., Hondzinski, J. M., & Harper, J. G. (2000). Gaze direction effects on perceptions of upper limb kinesthetic coordinate system axes. *Experimental Brain Research*, 135(3), 360-372.
- Descarreaux, M., Passmore, S. R., & Cantin, V. (2010). Head movement kinematics during rapid aiming task performance in healthy and neck-pain participants: the importance of optimal task difficulty. *Manual Therapy*, 15(5), 445-450.
- Desmurget, M. & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 423-431.

- Desmurget, M., Rossetti, Y., Jordan, M., Meckler, C., & Prablanc, C. (1997). Viewing the hand prior to movement improves accuracy of pointing performed toward the unseen contralateral hand. *Experimental Brain Research*, 115(1), 180-186.
- Feys, P., Helsen, W. F., Liu, X., Nuttin, B., Lavrysen, A., Swinnen, S. P., & Ketelaer, P. (2005). Interaction between eye and hand movements in multiple sclerosis patients with intention tremor. *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society*, 20(6), 705-713.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391.
- Fogt, N., Uhlig, R., Thach, D. P., & Liu, A. (2002). The influence of head movement on the accuracy of a rapid pointing task. *Optometry – Journal of the American Optometric Association*, 73(11), 665-673.
- Freedman, E. G., & Sparks, D. L. (2000). Coordination of the eyes and head: movement kinematics. *Experimental Brain Research*, 131(1), 22-32.
- Furneaux, S., & Land, M. F. (1999). The effects of skill on the eye-hand span during musical sight-reading. *Proceedings of The Royal Society: Biological Sciences*, 266(1436), 2435-2440.
- Gauthier, G. M., Nommay, D., & Vercher, J. L. (1990). The role of ocular muscle proprioception in visual localization of targets. *Science*, 249(4964), 58-61.
- Gaymard, B., Siegler, I., Rivaud-Péchoux, S., Israel, I., Pierrot-Desilligny, C., & Berthoz, A. (2000). A common mechanism for the control of eye and head movements in humans. *Annals of Neurology*, 47(6), 819-822.
- Golberg, M. (s. d.). The control of gaze. In: E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessel (Eds.), *Principles of Neural Science* (4th ed.) (pp. 782-800). New York, Elsevier.
- Goodale, M. A. (1996). Visuomotor modules in the vertebrate brain. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 74(4), 390-400.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15(1), 20-25.
- Guerraz, M., Blouin, J., & Vercher, J.-L. (2003). From head orientation to hand control: evidence of both neck and vestibular involvement in hand drawing. *Experimental Brain Research*, 150(1), 40-49.

- Guerraz, M., Caudron, S., Thomassin, N., & Blouin, J. (2011). Influence of head orientation on visually and memory-guided arm movements. *Acta Psychologica*, 136(3), 390-398.
- Guerraz, M., Navarro, J., Ferrero, F., Cremieux, J., & Blouin, J. (2006). Perceived versus actual head-on-trunk orientation during arm movement control. *Experimental Brain Research*. 172(2), 221-229.
- Guiard, Y. (1993). On Fitts's and Hooke's laws: simple harmonic movement in upper-limb cyclical aiming. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 139-159.
- Guiard, Y. (1997). Fitts' law in the discrete vs. cyclical paradigm. *Human Movement Science*, 16(1), 97-131.
- Helsen, W. F., Elliott, D., Starkes, J. L., & Ricker, K. L. (1998). Temporal and spatial coupling of point of gaze and hand movements in aiming. *Journal of Motor Behavior*, 30(3), 249-259.
- Helsen, W. F., Elliott, D., Starkes, J. L., & Ricker, K. L. (2000). Coupling of eye, finger, elbow, and shoulder movements during manual aiming. *Journal of Motor Behavior*, 32(3), 241-248.
- Henriques, D. Y., Klier, E. M., Smith, M. A., Lowy, D., & Crawford, J. D. (1998). Gaze-centered remapping of remembered visual space in an open-loop pointing task. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 18(4), 1583-1594.
- Henriques, D. Y. P., & Crawford, J. D. (2002). Role of eye, head, and shoulder geometry in the planning of accurate arm movements. *Journal of Neurophysiology*, 87(4), 1677-1685.
- Hoffmann, E. R., & Hui, M. C. (2010). Movement times of different arm components. *Ergonomics*, 53(8), 979-993.
- Jagacinski, R. J., & Monk, D. L. (1985). Fitts' Law in two dimensions with hand and head movements. *Journal of Motor Behavior*, 17(1), 77-95.
- Jeannerod, M. (1986). Mechanisms of visuomotor coordination: a study in normal and brain-damaged subjects. *Neuropsychologia*, 24(1), 41-78.
- Jeannerod, M. (1988). *The Neural and Behavioural Organization of Goal-Directed Movements*. Oxford, Clarendon Press/Oxford University Press.
- Karnath, H. O., Sievering, D., & Fetter, M. (1994). The interactive contribution of neck muscle proprioception and vestibular stimulation to subjective « straight ahead » orientation in man. *Experimental Brain Research*. 101(1), 140-146.

- Kim, K. H., Gillespie, R. B., & Martin, B. J. (2007). Head movement control in visually guided tasks: postural goal and optimality. *Computers in Biology and Medicine*, 37(7), 1009-1019.
- Kim, K. H. (2005). *Modeling of Head and Hand Coordination in Unconstrained Three Dimensional Movements*.  
Thèse de doctorat non-publiée, Université du Michigan-Ann Arbor
- Land, M. F. (2004). The coordination of rotations of the eyes, head and trunk in saccadic turns produced in natural situations. *Experimental Brain Research*. 159(2), 151-160.
- Land, M. F. (2009). Vision, eye movements, and natural behavior. *Visual Neuroscience*, 26(1), 51-62.
- Lazzari, S., Mottet, D., & Vercher, J.-L. (2009). Eye-hand coordination in rhythmical pointing. *Journal of Motor Behavior*, 41(4), 294-304.
- Medendorp, W. P., & Crawford, J. D. (2002). Visuospatial updating of reaching targets in near and far space. *Neuroreport*, 13(5), 633-636.
- Milner, T. E. (1992). A model for the generation of movements requiring endpoint precision. *Neuroscience*, 49(2), 487-496.
- Paillard, J. (1982). The contribution of peripheral and central vision to visually guided reaching. In : D. J. Ingle, M. A. Goodale, D. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of Visual Behavior* (pp. 367-385). Cambridge, MIT Press.
- Paillard, J. (1991). Motor and representational framing of space. In : J. Paillard (Ed.), *Brain and Space* (pp. 163-182).  
Oxford, Oxford University Press
- Paillard, J. (1996). Fast and slow feedback loops for the visual correction of spatial errors in a pointing task: a reappraisal. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 74(4), 401-417.
- Passmore, S. R., Burke, J., & Lyons, J. (2007). Older adults demonstrate reduced performance in a Fitts' task involving cervical spine movement. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 24(4), 352-363.
- Passmore, S. R., Burke, J. R., Good, C., Lyons, J. L., & Dunn, A. S. (2010). Spinal manipulation impacts cervical spine movement and fitts' task performance: a single-blind randomized before-after trial. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 33(3), 189-192.
- Plamondon, R., & Alimi, A. M. (1997). Speed/accuracy trade-offs in target-directed movements. *The Behavioral and Brain Sciences*, 20(2), 279-303.

- Prablanc, C., Echallier, J. E., Jeannerod, M., & Komilis, E. (1979). Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target. II. Static and dynamic visual cues in the control of hand movement. *Biological Cybernetics*, 35(3), 183-187.
- Prablanc, C., & Martin, O. (1992). Automatic control during hand reaching at undetected two-dimensional target displacements. *Journal of Neurophysiology*, 67(2), 455-469.
- Rossetti, Y., Desmurget, M., & Prablanc, C. (1995). Vectorial coding of movement: vision, proprioception, or both? *Journal of Neurophysiology*, 74(1), 457-463.
- Rossetti, Y., Tadary, B., & Prablanc, C. (1994). Optimal contributions of head and eye positions to spatial accuracy in man tested by visually directed pointing. *Experimental Brain Research*. 97(3), 487-496.
- Sarlegna, F., Blouin, J., Vercher, J.-L., Bresciani, J.-P., Bourdin, C., & Gauthier, G. M. (2004). Online control of the direction of rapid reaching movements. *Experimental Brain Research*. 157(4), 468-471.
- Saunders, J. A., & Knill, D. C. (2005). Humans use continuous visual feedback from the hand to control both the direction and distance of pointing movements. *Experimental Brain Research*. 162(4), 458-473.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4), 225-260.
- Schmidt, R. A., Lee, T. D. (2005). *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis* (4th ed.). Champaign, Human Kinetics.
- Sherrington, G. (1906). *The Integrative Action of the Nervous System*. New Haven, Yale University Press.
- Smeets, J. B., Hayhoe, M. M., & Ballard, D. H. (1996). Goal-directed arm movements change eye-head coordination. *Experimental Brain Research*. 109(3), 434-440.
- Sober, S. J., & Sabes, P. N. (2003). Multisensory integration during motor planning. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 23(18), 6982-6992.
- Terrier, R., Forestier, N., Berrigan, F., Germain-Robitaille, M., Lavallière, M., & Teasdale, N. (2011). Effect of terminal accuracy requirements on temporal gaze-hand coordination during fast discrete and reciprocal pointings. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 8, 10.
- Terrier, R. (2010). *Adaptabilité de la coordination visuo-manuelle : effets de la répétitivité et d'une fatigue musculaire localisée*. Thèse de doctorat non-publiée, Université de Savoie-Chambéry, Annecy

- Thaler, L., & Todd, J. T. (2009). The use of head/eye-centered, hand-centered and allocentric representations for visually guided hand movements and perceptual judgments. *Neuropsychologia*, 47(5), 1227-1244.
- Thompson, A. A., & Henriques, D. Y. P. (2010). Locations of serial reach targets are coded in multiple reference frames. *Vision Research*, 50(24), 2651-2660.
- Ungerleider, L., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In : D. J. Ingle, M. A. Goodale, D. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of Visual Behavior* (pp. 549-586). Cambridge, MIT Press
- Van der Fits, I. B., Otten, E., Klip, A. W., Van Eykern, L. A., & Hadders-Algra, M. (1999). The development of postural adjustments during reaching in 6- to 18-month-old infants. Evidence for two transitions. *Experimental Brain Research*. 126(4), 517-528.
- Van der Heide, J. C., Otten, B., van Eykern, L. A., & Hadders-Algra, M. (2003). Development of postural adjustments during reaching in sitting children. *Experimental Brain Research*. 151(1), 32-45.
- Vercher, J. L., Magenes, G., Prablanc, C., & Gauthier, G. M. (1994). Eye-head-hand coordination in pointing at visual targets: spatial and temporal analysis. *Experimental Brain Research*., 99(3), 507-523.
- Volkman, F. C., Schick, A. M., & Riggs, L.A. (1968). Time course of visual inhibition during voluntary saccades. *Journal of the Optical Society of America*, 58(4), 562-569.
- Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review*, 3(1), 1-106.