

Université de Montréal

Représentation interne des caractéristiques physiques d'un objet

Par

Nicolas Lefebvre

Département de kinésiologie

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures

En vue de l'obtention du grade de M.Sc. Sciences de l'activité physique

Juillet 2009

© Nicolas Lefebvre, 2009

Université de Montréal

Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

Représentation interne des caractéristiques physiques d'un objet

Présenté par :

Nicolas Lefebvre

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Luc Proteau

Président rapporteur

Julie Messier

Directeur de recherche

François Prince

Membre du jury

SOMMAIRE

Dans les situations du quotidien, nous manipulons fréquemment des objets sans les regarder. Pour effectuer des mouvements vers une cible précise avec un objet à la main, il est nécessaire de percevoir les propriétés spatiales de l'objet. Plusieurs études ont démontré que les sujets peuvent discriminer entre des longueurs d'objet différentes sans l'aide des informations visuelles et peuvent adapter leurs mouvements aux nouvelles caractéristiques inertielles produites lors de la manipulation d'un objet. Dans cette étude, nous avons conduit deux expérimentations afin d'évaluer la capacité des sujets à adapter leurs mouvements d'atteinte à la longueur et à la forme perçues des objets manipulés sur la base unique des sensations non visuelles (sensations haptiques). Dans l'expérience 1, dix sujets devaient exécuter des mouvements d'atteintes vers 4 cibles tridimensionnelles (3D) avec un objet à la main. Trois objets de longueur différente ont été utilisés (pointeurs: 12.5, 17.5, 22.5 cm). Aucune connaissance de la position de la main et de l'objet par rapport à la cible n'était disponible pendant et après les mouvements vers les cibles 3D. Ainsi, lorsque comparé avec les erreurs spatiales commises lors des atteintes manuelles sans pointeur, l'erreur spatiale de chacun des mouvements avec pointeur reflète la précision de l'estimation de la longueur des pointeurs. Nos résultats indiquent que les sujets ont augmenté leurs erreurs spatiales lors des mouvements d'atteinte avec un objet en comparaison avec la condition sans pointeur. Cependant, de façon intéressante, ils ont maintenu le même niveau de précision à travers les trois conditions avec des objets de différentes longueurs malgré une différence de 10 cm entre l'objet le plus court et le plus long. Dans l'expérience 2, neuf sujets différents ont effectué des mouvements d'atteinte vers les mêmes cibles utilisant cette fois-ci deux objets en forme de L (objet no.1 : longueur de 17,5 cm et déviation à droite de

12,5 cm – objet no.2 : longueur de 17,5 cm et déviation à droite de 17,5 cm). Comme c'était le cas lors de l'expérience 1, les sujets ont augmenté leurs erreurs spatiales lors des mouvements d'atteinte avec les objets et cette augmentation était similaire entre les deux conditions avec les objets en forme de L. Une observation frappante de l'expérience 2 est que les erreurs de direction n'ont pas augmenté de façon significative entre les conditions avec objet en forme de L et la condition contrôle sans objet. Ceci démontre que les participants ont perçu de façon précise la déviation latérale des objets sans jamais avoir eu de connaissances visuelles de la configuration des objets. Les résultats suggèrent que l'adaptation à la longueur et à la forme des objets des mouvements d'atteinte est principalement basée sur l'intégration des sensations haptiques. À notre connaissance, cette étude est la première à fournir des données quantitatives sur la précision avec laquelle le système haptique peut permettre la perception de la longueur et de la forme d'un objet tenu dans la main afin d'effectuer un mouvement précis en direction d'une cible.

Mots clés : atteintes manuelles, précision 3D, sensations haptiques, estimation de la longueur d'objets, estimation de la forme d'objets.

ABSTRACT

In everyday situations, we frequently manipulate objects without looking at them. To successfully perform goal directed movements with a handheld unseen object, one needs to perceive the spatial properties of the object. Several studies showed that subjects can discriminate between different object lengths without visual information and are able to adapt movements to novel manipulation dynamics. In this study, we evaluated the ability of subjects to adapt their reaching movements to the perceived length and shape of unseen handheld objects (haptic sensations) in two different experimentations. In experiment 1, ten subjects were required to reach to 4 different memorized 3D targets with handheld objects having three different lengths (12.5, 17.5 and 22.5 cm). No feedback of hand or object position relative to the target location was provided during and after the movements. Therefore, when compared with the ‘control’ no object condition, the spatial error of each movement reflects the precision of length perception and movement adaption in a given condition. Our results show that subjects increased their spatial errors while reaching with a handheld object compared to the no object condition. However, interestingly, they maintained the same accuracy level across the three different object length conditions despite a 10 cm length difference between the shorter and longer object. In experiment 2, nine different subjects reached to the same targets using two L-shaped objects (object no.1: 17.5 cm length and 12.5 cm rightward deviation- object no.2: 17.5 cm length and 17.5 cm deviation). As in experiment 1, subjects increased their spatial errors while reaching with handheld objects, but this increase was similar between the two object shape conditions. A striking observation is that subjects did not significantly increase their directional errors in both object shape conditions compared to the no object condition. This demonstrates that they accurately

perceived the lateral deviation of objects despite never seeing nor having any explicit knowledge of object configurations. The results indicate that adaptation of reaching movements to the perceived length and shape of handheld objects is largely based on haptic sensations. To our knowledge, this study is the first to provide a quantitative evaluation of the ability of the haptic system to perceive the length and the shape of handheld objects in order to perform an accurate goal directed movement.

Key words : reaching movement, 3D accuracy, haptic sensations, object length perception, object shape perception.

TABLES DES MATIÈRES

SOMMAIRE	III
ABSTRACT	V
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES ABREVIATIONS	XII
REMERCIEMENTS	XIII
DEDICACE	XIV
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2. RECENSION DES ECRITS	6
2.1 SENSATIONS HAPTQUES.....	6
2.1.2 <i>Toucher discriminatoire</i>	7
2.1.1 <i>Toucher dynamique</i>	10
2.2 PERCEPTION DE LA LONGUEUR D'UN OBJET ET TOUCHER DYNAMIQUE.....	12
2.3.1 <i>Densité</i>	14
2.3.2 <i>Moment de force</i>	15
2.3.3 <i>Moment d'inertie</i>	17
2.4 PERCEPTION DE LA FORME ET DE L'ORIENTATION D'UN OBJET ET TOUCHER DYNAMIQUE.....	19
2.5 CONTROLE EN TEMPS REEL LORS DE L'EXECUTION D'ATTEINTES MANUELLES.....	22
CHAPITRE 3 : METHODE	26
3.1 PARTICIPANTS.....	26
3.2 MONTAGE EXPERIMENTAL ET PROCEDURE.....	26
3.3 CONDITIONS EXPERIMENTALES.....	29
3.3.1 <i>Expérience 1</i>	30
3.3.2 <i>Expérience 2</i>	31
3.4 ENREGISTREMENT DE LA CINEMATIQUE DES MOUVEMENTS.....	32
3.5 INDICES DE PERFORMANCE.....	33
3.6 ANALYSE STATISTIQUE.....	35
CHAPITRE 4 : RESULTATS	37
4.1 EXPERIENCE 1 : ADAPTATION DES MOUVEMENTS D'ATTEINTE MANUELLE A LA LONGUEUR D'UN OBJET TENU DANS LA MAIN SANS INFORMATION VISUELLE.....	37
4.1.1 <i>Erreurs 3D absolues et variables</i>	37
4.1.2 <i>Composantes de l'erreur 3D</i>	39
4.1.3 <i>Ajustements produits le long des trois axes de l'espace 3D</i>	42
4.2 EXPERIENCE 2: ADAPTATION DES MOUVEMENTS D'ATTEINTE MANUELLE A LA FORME D'UN OBJET TENU DANS LA MAIN SANS INFORMATION VISUELLE.....	47
4.2.1 <i>Erreurs 3D absolues et variables</i>	47

4.2.2 Composantes de l'erreur 3D	49
4.2.3 Ajustements produits le long des trois axes de l'espace 3D.....	52
4.2.4 Planification motrice et contrôle en temps réel	54
4.2.5 Expérience 1 vs expérience 2.....	57
CHAPITRE 5: DISCUSSION ET CONCLUSION.....	59
5.1 EXPERIENCE 1	59
5.1.1 Perception de la longueur des pointeurs et ajustement du mouvement.....	60
5.2 EXPERIENCE 2	65
5.2.1 Perception de la longueur et de la forme des pointeurs et ajustement du mouvement.....	66
5.3 CONTROLE EN TEMPS REEL.....	69
5.3 EXPERIENCE 3	71
5.4 CONCLUSION	73
RÉFÉRENCES	75

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Montage expérimental utilisé lors de la grande majorité des études portant sur l'estimation de la longueur des pointeurs sur la base des informations haptiques (Chang et al., 2008).
- Figure 2 : Montage sur rail utilisé pour la présentation des cibles (A). Disposition spatiale des 4 cibles des trois expériences (B).
- Figure 3 : Erreurs 3D absolues et 3D variables. Les erreurs 3D absolues correspondent à la distance 3D entre la cible et chacune des positions finales des mouvements dirigés vers cette cible.
- Figure 4 : Moyenne des erreurs 3D absolues (A) et des erreurs variables (B) de l'expérience 1 pour les 10 sujets et les conditions sans pointeur, petite pointeur, moyen pointeur et long pointeur. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne pour chaque condition.
- Figure 5 : Moyenne des erreurs de direction, de distance radiale et d'élévation constantes (A) et absolues (B) à travers les 10 sujets de l'expérience 1. Les conditions sans pointeur, petit pointeur, moyen pointeur et long pointeur sont représentées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne.
- Figure 6 : Moyenne des erreurs variables de direction, de distance radiale et d'élévation à travers les 10 sujets de l'expérience 1. Les conditions sans pointeur, petit pointeur, moyen pointeur et long pointeur sont représentées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne.
- Figure 7 : Moyenne des coefficients de détermination (R^2) entre la position du doigt/pointeur au sommet de vitesse et à la fin du mouvement pour les 10 sujets de l'expérience 1. La fraction au-dessus de chaque barre représente la proportion de coefficients de détermination (R^2) significatifs ($P < 0,05$) sur le nombre d'essai total. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne.
- Figure 8 : Moyenne des erreurs 3D absolues (A) et des erreurs variables (B) de l'expérience 2 pour les 9 sujets et les conditions sans pointeur, petite pointeur et long pointeur. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne pour chaque condition.

Figure 9 : Moyenne des erreurs de direction, de distance radiale et d'élévation constantes (A) et absolues (B) à travers les 9 sujets de l'expérience 2. Les conditions sans pointeur, petit pointeur et long pointeur sont représentées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne.

Figure 10 : Moyenne des erreurs variables de direction, de distance radiale et d'élévation à travers les 9 sujets de l'expérience 2. Les conditions sans pointeur, petit pointeur et long pointeur sont représentées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne.

Figure 11 : Moyenne des coefficients de détermination (R^2) entre la position du doigt/pointeur au sommet de vitesse et à la fin du mouvement pour les 9 sujets de l'expérience 2. La fraction au-dessus de chaque barre représente la proportion de coefficients de détermination (R^2) significatifs ($P < 0.05$) sur le nombre d'essai total. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne.

Figure 12 : Comparaison entre l'expérience 1 et l'expérience 2 au niveau de la moyenne des erreurs absolus 3D (A), des erreurs de distance radiale (B), des erreurs de direction (C) et finalement des erreurs d'élévation (D). Les conditions sans pointeur et les conditions avec pointeurs de 17,5 cm sont représentées.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Moyenne de tous les déplacements effectués par le poignet en distance radiale, direction et élévation pour tous les sujets et toutes les cibles de l'expérience 1. Les conditions sans pointeur, petit pointeur, moyen pointeur et long pointeur sont représentées.

Tableau 2 : Moyenne de tous les déplacements effectués par le poignet en distance radiale, direction et élévation pour tous les sujets et toutes les cibles de l'expérience 2. Les conditions sans pointeur, petite déviation latérale et grande déviation latérale sont représentées.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

3D	Trois dimensions
ANOVA	Analyse de variances
cm	Centimètre
d_x	distance en direction
d_y	distance en distance radiale
d_z	distance en élévation
F	F calculé de Greenhouse-Geisser
g	Grammes
Hz	Hertz
Kg/m^3	kilogramme par mètre cubique
L	Longueur
m	Mètre
ms	Milliseconde
M	Moyenne
p	Probabilité
s	Seconde
SD	Écart-type
Vmax	Vitesse maximale

REMERCIEMENTS

Je souhaite, tout d'abord, adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont ainsi contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Tout d'abord, Dr. Julie Messier, directrice de ce mémoire, pour l'aide et le temps qu'elle a bien voulu me consacrer. J'exprime aussi ma gratitude à mes collègues, David, Alexandra et Stéphane qui m'ont aidé à progresser et à continuer à aller de l'avant malgré les différents défis qu'offre la maîtrise.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire. Plus particulièrement, à ma conjointe Géraldine. Je souhaite aussi remercier Meggan qui a toujours su être là pour moi dans les beaux moments comme dans les moments plus difficiles.

DÉDICACE

Ce mémoire est dédié à mes parents, Raynald Lefebvre et Hélène Dubé, qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études. Sans ma mère, je n'aurais certainement pas fait d'aussi longues études et, sans mon père, je n'aurais jamais su avoir autant de plaisir pendant la réalisation de ces études. Ce mémoire représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements qu'ils m'ont prodigué tout au long de ma vie. Merci de toujours avoir été là pour moi et de m'avoir transmis la meilleure éducation possible.

Qu'ils en soient remerciés par cette trop modeste dédicace.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

La précision avec laquelle nous manipulons différents objets dépend de la capacité à percevoir les caractéristiques physiques des segments de notre bras et des objets manipulés. Par exemple, lorsque nous manipulons un objet pour la première fois (bâton de golf), nous devons estimer la relation entre la longueur et la forme de cet objet et l'amplitude et la direction du mouvement de bras requis pour atteindre la cible (balle de golf). Nous devons également estimer la relation entre la masse de cet objet et les forces requises pour maintenir et déplacer le segment bras-objet. L'aisance avec laquelle nous interagissons avec plusieurs objets dont les caractéristiques physiques sont différentes (ustensiles, crayon, raquette de tennis) démontre notre capacité à intégrer une variété de signaux en provenance des récepteurs sensoriels périphériques et des régions du cerveau qui contrôlent les mouvements (copies efférentes) afin de former une représentation interne précise des propriétés physiques des objets manipulés.

Lors du contrôle des mouvements volontaires, la vision, la proprioception, les informations cutanées et les copies efférentes fournissent des informations redondantes et complémentaires sur les caractéristiques du corps et des objets utilisés. On considère généralement que les propriétés géométriques d'un objet, comme sa longueur et sa forme sont estimées sur la base de la vision, alors que la perception de la masse d'un objet est principalement déterminée à l'aide d'une combinaison d'informations non visuelles (proprioceptives, cutanées, copies efférentes) ou sensations haptiques. Les informations visuelles peuvent cependant fournir une approximation de la masse d'un objet. Par exemple, lorsque nous

apercevons un verre d'eau presque plein ou pratiquement vide, nous ajustons la force utilisée pour soulever le verre en fonction de la masse estimée du verre et de son contenu. De façon similaire, les sensations haptiques peuvent être utilisées pour estimer la longueur et la forme d'un objet; c'est le défi relevé par les personnes aveugles tous les jours!

Dans la vie quotidienne, nous manipulons fréquemment des objets sans les regarder. Dans cette circonstance, nous devons percevoir les caractéristiques spatiales de l'objet manipulé sur la base des sensations haptiques. Certaines études ont évalué l'habileté de sujets à percevoir les caractéristiques géométriques d'un objet en l'absence de vision (Solomon et Turvey, 1988 et 1992 ; Pagano et al., 1994 et 1996 ; Kingma et al., 2004 ; Chan, 1994, 1995 et 1996 ; Chang et al., 2008 ; Carello et al., 2006 ; Cooper et al., 1996 ; Stroop et al., 2000 ; Amazeen et Turvey, 1996). Ces études ont porté principalement sur l'habileté à estimer la longueur d'un objet tenu dans la main (pointeurs) sans vision du bras et de l'objet et sans exploration tactile préalable. Bien que ces recherches antérieures aient fourni des données importantes sur les mécanismes à la base de la perception de la longueur d'un objet tenu dans la main, elles comportaient toutes une limite importante. Elles se déroulaient dans un contexte très peu fonctionnel, qui ne s'apparente pas aux situations de la vie quotidienne. Tout d'abord, dans toutes ces études, des pointeurs de plus de 30 cm ont été utilisés. De plus, les sujets devaient estimer la longueur des pointeurs, soit en les gardant immobiles dans la main ou en les faisant osciller dans les airs dans une direction aléatoire. Or, dans la vie courante, lorsque nous utilisons des objets, c'est généralement avec l'objectif d'atteindre une cible précise. Par exemple, la fourchette, le marteau, le bâton de golf ou encore l'instrument de chirurgie sont toujours dirigés

vers une cible bien précise lorsque nous les manipulons. Qui plus est, plusieurs de ces objets présentent une longueur inférieure à 30 cm.

Deux observations particulièrement intéressantes ressortent de ces études antérieures. La première est que le simple fait d'effectuer un mouvement avec l'objet tenu dans la main permet une meilleure estimation de sa longueur. Selon des recherches, le déplacement de l'objet permet l'exploration des propriétés inertielles du segment bras-objet et en retour renseigne sur la longueur de l'objet manipulé (voir Turvey 1996, pour une revue). Deuxièmement, la distribution de la masse de l'objet modifie la perception de sa longueur (Solomon et Turvey, 1988 ; Pagano et al., 1994 et 1996 ; Kingma et al., 2004 ; Chan, 1994 ; Carello et al., 2006 ; Stroop et Turvey, 2000). Étant donné que le centre de masse d'un objet varie systématiquement avec sa forme, la capacité d'estimer la distribution de la masse d'un objet pourrait en retour permettre d'estimer sa forme. À notre connaissance, aucune étude n'a évalué si le système haptique permet d'estimer avec précision la forme d'un objet tenu dans la main afin d'amener l'extrémité de cet objet à la position d'une cible.

Le contrôle d'actions qui impliquent la manipulation d'un objet tenu dans la main requiert la perception continue et simultanée de la longueur et de la forme de l'objet ainsi que sa position et son orientation dans la main et dans l'espace. Plusieurs études ont démontré que de jeunes adultes en santé peuvent discriminer entre des objets de différentes longueurs sans information visuelle (Solomon et Turvey, 1988 ; Pagano et al., 1996 ; Kingma et al., 2004 ; Chan et Turvey, 1991 ; Chan, 1994, 1995 et 1996 ; Chang et al., 2008 ; Carello et al., 2006 ; Stroop et al., 2000) et peuvent adapter leurs mouvements de bras à de nouvelles caractéristiques inertielles

(Gandolfo et al., 1996 ; Sainburg et al., 1999 ; Criscimagna-Hemminger et al., 2003 ; Kording et al., 2007). Cependant, aucune étude n'a encore évalué l'habileté de sujets à percevoir de façon simultanée la longueur et la forme d'un objet tenu dans la main sans l'aide de la vision.

Le premier objectif de cette étude était d'évaluer la précision avec laquelle les sensations haptiques permettent d'estimer la longueur d'objets (pointeurs) qui s'apparentent à ceux manipulés dans la vie quotidienne (crayon, fourchette, marteau etc.). Pour ce faire, nous avons utilisé une tâche d'atteintes manuelles vers des cibles tridimensionnelles (3D) dont les positions étaient définies par des informations haptiques. Lors d'une première expérimentation, nous avons utilisé des pointeurs de trois longueurs différentes. Dans chacune des conditions expérimentales, les sujets devaient diriger l'extrémité du pointeur tenu dans la main à la position d'une cible.

Le deuxième objectif de cette étude était de déterminer si les sensations haptiques peuvent également permettre une estimation précise de la forme des objets. Dans une seconde expérimentation, nous avons utilisé deux pointeurs de forme différente et de longueur identique. De façon similaire à l'expérimentation 1, les sujets avaient la consigne de diriger l'extrémité de l'objet (en forme de L) à la position de la cible 3D. Les protocoles utilisés dans les expérimentations 1 et 2 ont donc permis d'évaluer l'habileté des sujets à adapter les caractéristiques cinématiques du mouvement d'atteinte manuelle à la longueur et la forme perçues d'un objet.

Plusieurs études ont suggéré que le système moteur dispose de mécanismes de contrôle en temps réel qui corrigent les erreurs de perception et de mouvements

durant l'exécution d'une atteinte manuelle (Prablanc et al., 1979 a et b ; Carlton et al., 1981 ; Desmurget et al., 2000 ; Bédard et Proteau, 2001 ; Khan et al., 2006 ; Pélisson et al., 1986 ; Gordon et Ghez, 1987 ; Saunders et Knill, 2003, 2004 et 2005 ; Soechting et Lacquaniti, 1983). Qui plus est, des données récentes montrent que ces mécanismes peuvent être efficaces sur la base unique d'informations non visuelles (Gosselyn-Kessiby et al., 2008, 2009). Dans cette perspective, il est vraisemblable que, durant une atteinte manuelle avec un objet tenu dans la main, nous continuons de cueillir et traiter des informations permettant d'améliorer notre perception de la longueur et de la forme de l'objet et ainsi adapter en temps réel les caractéristiques cinématiques de notre mouvement. Dans cette recherche, certaines analyses cinématiques nous ont permis d'évaluer si la précision finale des mouvements de bras avec un objet tenu dans la main dépend prioritairement de processus de perception et de planification motrice qui précèdent l'amorce du mouvement ou de processus qui corrigent, en temps réel, les erreurs initiales de perception et de mouvement.

CHAPITRE 2. RECENSION DES ÉCRITS

Au cours du siècle dernier, la recherche scientifique sur le traitement des informations sensorielles et les habiletés perceptuelles humaines a énormément évolué. La terminologie utilisée pour faire référence à différents aspects du traitement sensitif a varié en fonction des hypothèses dominantes et des champs d'étude spécifiques. Ce mémoire porte sur la capacité de percevoir les propriétés géométriques (longueur et forme) d'un objet sans l'aide de la vision. La première partie de cette recension des écrits présentera donc quelques définitions et concepts actuels utilisés dans ce domaine spécifique de recherche.

2.1 Sensations haptiques

Bien que la sensation haptique ne soit pas considérée comme l'un des 5 sens (toucher, vision, goût, ouïe et odorat), elle est très utile lors de l'estimation des caractéristiques physiques (poids, longueur, circonférence, etc.) des objets que nous manipulons au quotidien. Le mot haptique tient son origine du mot grec haptos, qui signifie sentir en touchant (Pasquinelli, 2003). Selon la définition originale de Gibson (1966), la sensation haptique est la perception de l'environnement adjacent à notre corps au moyen de notre corps. Les sensations haptiques à elles seules permettent d'identifier des objets complexes de notre vie quotidienne moyennant une très courte période d'exploration de l'objet (Klatzky et al., 1985). Elles jouent un rôle essentiel en absence de vision et pourraient jouer un plus grand rôle que la vision dans le contrôle des activités de manipulation d'objets (Gibson, 1966). Les sensations haptiques sont constituées de deux principaux sous-systèmes : le toucher

discriminatoire et le toucher dynamique.

Dans les paragraphes qui suivent, nous définirons ces différents types de toucher ainsi que leur rôle respectif lors de l'estimation des caractéristiques physiques des objets manipulés.

2.1.2 Toucher discriminatoire

Les informations tactiles

Les informations tactiles proviennent de la stimulation mécanique (ou déformation) de la peau et des tissus profonds sous-cutanés. Les informations tactiles réfèrent aux sensations de toucher léger, de vibrations, de pression et d'étirement de la peau. Ces sensations proviennent de quatre classes de mécanorécepteurs spécialisés: les corpuscules de Meissner, les disques de Merkel, les corpuscules de Pacini et les terminaisons de Ruffini (Kandel et al., 2000). Chaque classe de mécanorécepteurs est sensible à des stimulations mécaniques particulières. Cependant, la stimulation naturelle de la peau, par exemple la stimulation produite lorsque nous saisissons un objet, le soulevons et le replaçons sur une surface, entraîne l'activation d'une population de mécanorécepteurs (Kandel et al., 2000). Les corpuscules de Meissner, les disques de Merkel et les corpuscules de Pacini sont activés par la pression qu'exerce les différentes parties de l'objet sur la peau, tandis que les terminaisons de Ruffini sont activées par l'étirement de la peau produit lorsque la main se referme sur l'objet. La combinaison de ces signaux fournit des informations sur la taille et la forme de l'objet. Les corpuscules de Meissner sont également très actifs durant la phase initiale de contact avec l'objet à mesure que la force de saisie augmente, alors

que les disques de Merkel demeurent actifs pour toute la durée du mouvement afin de signaler, de façon continue, la force de saisie. Par ailleurs, les corpuscules de Pacini sont prioritairement activés lors des pressions transitoires exercées sur la peau lorsque l'objet sera soulevé et replacé sur la surface. Finalement, les terminaisons de Ruffini signalent les forces verticales gravitationnelles appliquées sur la peau lorsque l'objet est soulevé. Cette brève description des principales contributions des différents mécanorécepteurs cutanés lors de la saisie d'un objet démontre que l'intégration des informations sensorielles issues de ces récepteurs cutanés fournit des signaux importants au système moteur qui contrôle la main et le bras.

Informations proprioceptives

Les informations proprioceptives jouent également un rôle critique dans la perception et le contrôle des mouvements. La proprioception est la sensation des positions et des mouvements des segments du corps les uns par rapport aux autres sans la vision (Kandel et al., 2000). Alors que les récepteurs cutanés renseignent prioritairement sur les stimuli externes, les propriocepteurs fournissent de l'information sur les forces mécaniques qui ont leur origine dans le corps, spécifiquement dans le système musculo-squelettique (Purves et al., 2005).

Les fuseaux neuromusculaires sont situés dans les muscles, en parallèle aux fibres musculaires squelettiques et sont spécialisés dans la détection de la longueur et des changements de longueur des muscles. Ainsi, ils fournissent des informations précises sur les positions statiques de nos membres ainsi que sur la vitesse et la direction de leur mouvement. Les organes tendineux de Golgi sont situés dans les tendons et détectent le niveau de force contractile des muscles. Les récepteurs situés

dans les capsules articulaires et les corpuscules de Ruffini fournissent également des informations sur les positions et les déplacements des segments corporels. Les récepteurs articulaires signalent prioritairement les flexions et extensions extrêmes, alors que les terminaisons de Ruffini détectent l'étirement de la peau associé aux changements de position des segments.

Informations proprioceptives et le sens de l'effort

Les sensations proprioceptives des membres sont fréquemment la conséquence sensorielle à un mouvement. Pour cette raison, certains chercheurs ont longtemps pensé que la proprioception des membres ne dépend pas de signaux provenant des récepteurs périphériques, mais plutôt de signaux qui proviennent des régions du cerveau qui contrôlent les mouvements (Kandel et al., 2000 ; Lafargue et Sirigu, 2006). Les travaux du début du siècle d'Helmholtz (1866) ont été les premiers à souligner l'importance des centres moteurs dans la sensation. Selon Helmholtz, les régions cérébrales qui contrôlent les mouvements transmettent des signaux, d'une part, aux motoneurones dont l'activation provoque la contraction musculaire, et d'autre part, à d'autres régions du système nerveux central afin de fournir des détails sur le mouvement planifié (copie efférente). Selon cette hypothèse, la perception de la force développée par nos muscles, par exemple la sensation qui permet d'estimer le poids d'un objet ou la force utilisée pour le déplacement de notre bras, ne découlerait pas simplement de l'activation des mécanorécepteurs musculaires. Cette sensation appelée 'sens de l'effort' serait le résultat du processus volitionnel lui-même – c'est-à-dire le processus par lequel la contraction musculaire volontaire est produite (Lafargue et Sirigu, 2006). En d'autres termes, ceci signifie que la perception de la force volontaire provient prioritairement d'un sens de l'effort central

plutôt que d'un sens de la tension intramusculaire.

Nous savons aujourd'hui que les informations proprioceptives en provenance des récepteurs périphériques et les copies efférentes en provenance des centres moteurs fournissent des informations complémentaires dans la perception et le guidage des mouvements (Matthews, 1982 ; Wolpert et Flanagan, 2001 ; Desmurget et Grafton, 2003 ; Davidson et Wolpert, 2005 ; Lafargue et al., 2003 ; Lafargue et Sirigu, 2006).

2.1.1 Toucher dynamique

On considère généralement que le toucher réfère à l'expérience ressentie lorsque notre main se déplace sur la surface d'un objet ou lorsqu'une personne ou un objet contacte notre peau. Il existe cependant une forme de toucher qui est très importante et omniprésente et qui, en générale, est inconsciente. Cette forme de toucher entre en action aussitôt que nous saisissons un objet et le déplaçons (voir Turvey, 1996, pour une revue). Que ce soit des ciseaux pour couper du papier, une raquette de tennis pour faire un service ou encore des ustensiles pour couper, retourner ou mélanger les aliments, chaque action effectuée avec un objet tenu dans la main permet de cueillir des informations importantes pour la perception et le contrôle de nos mouvements.

Tous les objets que nous manipulons ont une masse et cette masse résiste à nos efforts pour déplacer l'objet. Cette résistance engendre une pression sur la main. Cette pression ainsi que les forces nécessaires pour maintenir et déplacer l'objet influencent la stimulation des mécanorécepteurs de la peau, des muscles et des tendons (Chang et al., 2008). Les caractéristiques physiques des objets (taille, forme et masse) que nous manipulons ont donc une influence directe sur les patrons de

stimulations des différents mécanorécepteurs périphériques ainsi que sur les sensations centrales d'efforts. Par conséquent, le simple fait de soulever un objet peut nous procurer des informations concernant les dimensions spatiales de cet objet (Chang et al., 2008). Cette perception que nous avons des caractéristiques de l'objet manipulé, sans exploration tactile, est connu sous le nom de toucher dynamique (Gibson, 1966). Les différents chercheurs oeuvrant dans ce domaine d'étude ont proposé que le toucher dynamique se distingue du toucher discriminatif par la contribution prédominante du sens de l'effort (Turvey, 1996, pour une revue). Cependant, ce n'est que récemment que cette hypothèse a été mise à l'épreuve.

Carello et ses collègues (2006) ont évalué si la perception d'une caractéristique importante des objets que nous manipulons, la longueur, provient prioritairement d'afférences sensorielles issues des mécanorécepteurs périphériques ou de signaux efférents à l'origine d'un sens central de l'effort. Ils ont testé les habiletés perceptives d'un patient (AA) présentant une neuropathie périphérique (malformation Arnold-Chiari de type 1 et une syrinx cervicale). AA est dépourvu de sensations tactiles et de proprioception au niveau de son bras gauche (toucher discriminatoire). Les sensations tactiles et proprioceptives de son bras droit et de ses jambes sont cependant intactes. Qui plus est, les capacités motrices de AA sont préservées. Il est donc capable de saisir et de soulever un objet avec sa main gauche sur demande de l'expérimentateur.

Afin d'évaluer la capacité du patient AA à percevoir la longueur d'un objet tenu dans sa main gauche (main affectée), les chercheurs ont utilisé le protocole développé par Turvey et ses collègues (1992) dans leurs travaux originaux. Ce protocole est

largement utilisé dans ce domaine d'étude (Figure 1 en annexe). Un mur est placé le long de l'axe médio-sagittal du sujet de sorte qu'il est impossible pour ce dernier de voir le bras qui saisit et manipule l'objet. Les sujets doivent estimer la longueur des pointeurs à l'aide d'un système de poulies situé du côté visible du mur. Ce système de poulies permet d'indiquer la position estimée de l'extrémité du pointeur de l'autre côté du mur. Trois pointeurs de longueurs différentes (45, 60, et 90 cm) étaient utilisés dans cette étude. De façon intéressante, alors que AA ne disposait d'aucune information tactile ni proprioceptive, les résultats ont montré que l'estimation de la longueur des pointeurs faite par AA avec sa main gauche était systématiquement corrélée avec la longueur réelle des pointeurs. Cependant, l'estimation de la longueur des pointeurs a été meilleure avec la main droite (intacte) qu'avec la main gauche. La main droite du sujet AA a montré une précision meilleure ou égale aux résultats des sujets contrôles en santé avec leur main dominante.

Les chercheurs ont conclu que le toucher dynamique dépend en grande partie du sens de l'effort provenant des régions cérébrales qui contrôlent les mouvements (copies efférentes). Cependant, les résultats de cette étude suggèrent que la perception précise des caractéristiques physiques d'un objet, en absence de vision, nécessite l'action synergique du toucher discriminatoire et du toucher dynamique (Carello et Kinsella-Shaw, 2006 ; Amazeen et Turvey, 1996 ; Carello et al., 2006).

2.2 Perception de la longueur d'un objet et toucher dynamique

Lorsque nous saisissons et tenons fermement un crayon entre le pouce et l'index et que nous le faisons osciller par des mouvements autour de l'articulation du poignet avec les yeux fermés, même si nous sommes en contact avec seulement une petite

portion du crayon, nous avons une impression assez précise de sa longueur.

Les travaux initiaux de Solomon et Turvey (1988) ont porté sur l'habileté de percevoir la longueur d'un objet sur la base exclusive des informations haptiques. Le but spécifique de ces expérimentations était de déterminer s'il est possible de bien percevoir la position de l'extrémité des objets que l'on manipule et ce, sans jamais avoir vu l'objet manipulé et sans jamais voir le bras qui déplace l'objet. Pour étudier cette habileté, la grande majorité de ces études ont utilisé un protocole développé par Solomon et Turvey en 1988 (Figure 1 en annexe). La tâche des sujets était de déterminer, uniquement sur la base des sensations haptiques, la longueur de portée d'un pointeur tenu fermement dans la main dominante des sujets (droite). Solomon et Turvey (1988) ont utilisé sept pointeurs en aluminium ayant des longueurs variant de 30,5 cm à 1,219 m avec une différence de 6 pouces (près de 15 cm) entre chaque pointeur. Tous les pointeurs avaient une distribution uniforme de la masse avec un rayon constant de 0,635 cm et une densité de $2,7\text{kg/m}^3$. Les résultats montrent une relation linéaire entre la longueur estimée et la longueur réelle des pointeurs. Les résultats montrent également une tendance générale qui est de surestimer la longueur des pointeurs les plus courts et de sous-estimer celle des plus longs. En moyenne, les longueurs perçues des sept pointeurs étaient entre 25,4 cm et 1,25 m. Ces résultats indiquent, qu'en moyenne, les sujets pouvaient facilement discriminer la longueur des différents pointeurs sur la base unique des sensations haptiques. Cependant, la taille des erreurs d'estimation pour chacun des sujets n'est pas rapportée dans cette étude. Dans cette étude et dans plusieurs autres études subséquentes, l'objectif principal était de comprendre les mécanismes à la base de cette perception en évaluant les facteurs physiques influençant la perception de la longueur des pointeurs

(Kingma et al., 2004 ; Cooper et al., 1996 ; Carello et al., 2006 ; Chan, 1996 ; Solomon et Turvey, 1988 ; Turvey et al., 1992 ; Pagano et al., 1994 et 1996 ; Chang et al., 2008 ; Stroop et al., 2000 ; Amazeen et Turvey, 1996).

La suite de cette revue de la littérature présente plus en détails certaines études importantes qui ont permis de découvrir quelles informations sont prioritaires afin de permettre au cerveau de percevoir de façon adéquate la longueur, la forme et l'orientation d'un objet tenu dans la main.

2.3.1 Densité

Étant donné que les objets que nous manipulons ont une masse et que la masse résiste à nos efforts pour déplacer un objet, la question est alors posée : est-ce que la masse d'un objet influence la perception de sa longueur? Dans un article paru en 1982, Epstein proposa un modèle de perception-perception. Ce modèle propose que pour estimer la longueur d'un pointeur non visible tenu de façon statique, il suffit d'utiliser une autre perception, le poids. En utilisant le poids de l'objet nous pouvons ensuite dériver vers une autre perception, la longueur. L'une des premières études utilisant des pointeurs et dont le but était de trouver l'impact qu'a la masse d'un objet sur l'estimation de sa longueur est celle de Solomon et Turvey (1988). Afin de déterminer si le poids de l'objet a une influence directe sur l'estimation de sa longueur, dix pointeurs ayant un rayon identique de 0,635 cm ont été utilisés; cinq pointeurs en aluminium et cinq pointeurs en métal. La longueur de chacun des pointeurs variait entre 30,5 et 91,4 cm avec une différence de 15,2 cm entre chacun des pointeurs. Chaque pointeur en métal avait son vis-à-vis en aluminium, identique

en longueur et en diamètre mais différent en densité étant donné sa composition. Les pointeurs en aluminium étaient presque trois fois plus légers que ceux en métal. En fait, la densité des pointeurs en aluminium était de $2,7 \text{ kg/m}^3$ versus $7,8 \text{ kg/m}^3$ pour ceux en métal. Le même protocole schématisé à la figure 1 a été utilisé afin de tester l'hypothèse que la masse du pointeur influence la perception de sa longueur. Les résultats indiquent une forte relation linéaire et significative entre la longueur perçue des pointeurs et leur longueur réelle et ce, indépendamment de la masse des pointeurs. Cette expérience a donc démontré que la densité d'un objet n'influence pas l'estimation de sa longueur. Par conséquent, le modèle de perception-perception d'Epstein (1982) n'a donc pas été supporté par ces données. Des études subséquentes (Pagano et al., 1996 ; Chan, 1995) ont obtenu un résultat similaire qui démontre que la densité des objets n'est pas un facteur qui affecte la discrimination haptique de la longueur d'un objet.

2.3.2 Moment de force

Dans toutes ces expérimentations de perception de la longueur de pointeurs, les sujets avaient la consigne de faire osciller les pointeurs en effectuant des mouvements du poignet avant de juger la longueur de pointeurs. Étant donné que ces mouvements oscillatoires sont essentiellement composés de rotations autour du poignet, les forces mécaniques qui prennent place quand les sujets essaient d'estimer la longueur des pointeurs sont des moments de force. Solomon et Turvey (1988) ont alors proposé l'hypothèse selon laquelle les moments de force qui interviennent lors des mouvements oscillatoires de l'objet influencent la perception de la longueur de l'objet. Pour tester cette hypothèse, on demandait aux participants de varier les modalités de mouvements oscillatoires au cours d'essais successifs (rapide et ample,

lent et court etc.). Les participants devaient également varier la fréquence à laquelle les mouvements oscillatoires d'amplitudes similaires étaient produits, en suivant le rythme imposé par un métronome. Cette approche permettait de manipuler les accélérations angulaires produites lors des mouvements et en retour, les moments de force générés. Les résultats de cette étude ont montré que, dans toutes ces conditions expérimentales, la longueur perçue des pointeurs demeurait inchangée.

Une autre approche permettant de manipuler les moments de force consiste à demander aux participants de varier le plan spatial le long duquel les mouvements oscillatoires sont produits (Solomon et al., 1989). Lorsque les mouvements sont produits le long de l'axe vertical, la gravité assiste et résiste aux mouvements. À l'opposé, lorsque les mouvements sont produits le long de l'axe horizontal, la contribution de la gravité est uniforme au cours des mouvements oscillatoires successifs. De façon similaire à l'expérimentation précédente, la relation entre la longueur perçue et la longueur réelle des pointeurs était identique lorsque les mouvements d'oscillations étaient restreints de façon stricte soit à la direction verticale soit à la direction horizontale. Solomon et Turvey (1988) ont alors suggéré que la perception de la longueur par le toucher dynamique dépend d'une quantité mécanique qui, contrairement aux moments de force, ne change pas en fonction de la nature des mouvements oscillatoires. Ils ont alors proposé l'hypothèse originale et encore dominante aujourd'hui que le moment d'inertie est le facteur déterminant dans la perception de la longueur d'un objet manipulé.

2.3.3 Moment d'inertie

La masse d'un objet est la résistance au déplacement de cet objet, alors que le moment d'inertie d'un objet est la résistance d'un objet à sa rotation – son inertie rotationnelle (Turvey, 1996, pour une revue). En d'autres termes, le moment d'inertie d'un objet par rapport à un axe donné représente la résistance associée au mouvement angulaire de cet objet par rapport à cet axe (Allard et Blanchi, 2000). Le terme le plus utilisé dans la littérature sur la perception de la longueur des pointeurs est : le tenseur inertiel. Il s'agit en fait d'un moyen utile de regrouper tous les moments d'inertie en une seule et même quantité. Un objet donné aura des moments d'inertie différents selon les différentes axes de rotation (x, y, z) et selon le fait qu'il soit en mouvement ou non. De façon générale, les différents moments d'inertie ne sont pas égaux à moins que l'objet soit parfaitement symétrique le long de ses trois axes.

Voici un exemple pour expliquer le moment d'inertie. Prenez deux disques A et B de masse identique. Le disque A possède un diamètre plus grand mais est plus étroit que le disque B. La force nécessaire pour accélérer le disque A (changer sa vitesse angulaire) sera plus grande puisque la distribution de sa masse est plus éloignée de son axe de rotation : une masse plus éloignée d'un point de rotation doit, pour une vitesse angulaire donnée, se déplacer plus rapidement qu'une masse plus près de l'axe de rotation. Le disque A possède donc un plus grand moment d'inertie que le disque B (adapté de Wikipédia). Par conséquent, le moment d'inertie d'un objet change si sa forme change. Les athlètes plongeurs et patineurs exploitent ses forces inertielles en modifiant la forme de leur corps. En rapprochant leurs segments corporels de l'axe médian du corps, ils diminuent leur moment d'inertie ce qui a

comme effet d'augmenter leur vitesse de rotation.

Kreifeldt et Chang (1979) ont été les premiers à démontrer que le toucher dynamique présente une sensibilité particulière au moment d'inertie. Deux protocoles expérimentaux ont été utilisés afin de supporter cette hypothèse. Le premier protocole expérimental consistait à varier la distribution de la masse des pointeurs en maintenant les autres propriétés physiques constantes. Une caractéristique fondamentale de ce protocole est que le centre de masse des pointeurs devait demeurer fixe. Afin de varier les moments d'inertie, de petits anneaux en métal ont été ajoutés sur les pointeurs à trois distances différentes de l'extrémité d'un pointeur. L'hypothèse spécifique testée était que la longueur perçue serait supérieure lorsque l'anneau en métal serait situé plus loin de la main (point de rotation inertiel). En d'autres termes, plus le moment d'inertie du pointeur serait grand, plus la longueur perçue serait grande. Les résultats de ces expérimentations ont supporté l'hypothèse que la longueur perçue des pointeurs augmente systématiquement avec la distance de l'anneau du point de rotation (Solomon et Turvey, 1988 ; Pagano et al., 1994 et 1996 ; Carello et al., 2006 ; Stroop et Turvey, 2000 ; Turvey et al., 1992).

Suite à ces résultats convaincants, le second paradigme expérimental qui devait être utilisé afin de confirmer cette hypothèse consistait à varier le point de rotation tout en maintenant constante la distribution de la masse des pointeurs. Les participants devaient donc positionner leur main à trois distances différentes de l'extrémité d'un pointeur (1/4, 1/2, 3/4). En accord avec l'hypothèse que le moment d'inertie est un facteur déterminant dans le jugement de la longueur d'un objet, les auteurs ont observé que la longueur perçue du pointeur était plus grande lorsque l'axe de rotation

du mouvement oscillatoire était plus éloigné du centre de masse du pointeur (moment d'inertie plus grand). Cette recherche et plusieurs autres études subséquentes ont démontré une forte relation entre la longueur perçue des objets et le moment d'inertie (Solomon et Turvey, 1988 ; Pagano et al., 1994 ; Pagano et al., 1996 ; Carello et al., 2006 ; Stroop et Turvey, 2000 ; Turvey et al., 1992).

D'autres études ont cependant démontré que le tenseur inertiel n'agit pas seul dans la perception des caractéristiques physiques d'un objet (Kingma et al., 2004 ; Chan, 1994). Par exemple, les travaux de Chan (1994) ont permis de conclure que la gravité agit sur la perception de la longueur des pointeurs. Cette idée fut confirmée par Kingma et ses collègues (2004). Selon ces derniers, le tenseur inertiel ne peut à lui seul fournir toutes les informations pour la perception de la longueur. Par exemple, dans les expériences où les sujets évaluent la longueur des pointeurs de façon statique, l'accélération angulaire se situe près de zéro. Néanmoins, les sujets parviennent à bien estimer la longueur des pointeurs. Il est donc peu probable que le moment d'inertie soit le seul facteur influençant la perception des caractéristiques physiques des objets. Il semble donc que les informations issues du moment d'inertie et du moment statique soient nécessaires à la perception précise de la longueur d'un objet.

2.4 Perception de la forme et de l'orientation d'un objet et toucher dynamique

Alors que la très grande majorité des études ont porté sur la perception de la longueur d'un objet, il est clair que pour manipuler de façon précise un objet, nous devons aussi percevoir la forme de l'objet ainsi que son orientation dans la main. Certaines études ont évalué si le mouvement oscillatoire d'un objet permettait de percevoir sa

forme en intégrant les informations provenant des différents moments d'inertie associés aux différentes dimensions de l'objet (Solomon & Turvey, 1988 ; Solomon et al., 1989 ; Burton et al., 1990). Burton et ses collègues ont démontré que si des participants produisent des mouvements oscillatoires d'un objet sans vision, ces derniers peuvent par la suite sélectionner (reconnaître) cet objet parmi un ensemble d'objets ayant différentes formes avec un taux de réussite bien au-delà de la chance. Cependant, aucune étude n'a quantifié de façon précise l'habileté de discriminer la forme d'un objet sur la base unique du toucher dynamique.

Une autre étude menée par Turvey et ses collaborateurs (1992) a évalué si le toucher dynamique permet de percevoir l'orientation d'un objet tenu dans la main. Ils ont utilisé un objet qui ressemble davantage à un outil : des pointeurs en forme de 'L'. Le manche de l'objet pouvait être placé dans la main de façon à ce que la branche puisse être orientée à n'importe quel angle entre 0° et 360° . La direction de la branche était systématiquement variée d'un essai à l'autre et les participants devaient estimer l'orientation de la branche. Turvey et al. (1992) ont testé l'hypothèse qu'à mesure que le moment d'inertie change en fonction de l'orientation de l'objet dans la main, la perception de l'orientation de l'objet change. Les résultats ont démontré que l'orientation perçue de la branche des pointeurs était linéairement liée à la direction réelle de la branche des pointeurs. De plus, la perception des participants était aussi précise lorsque la branche de l'objet était large (grande déviation latérale) que lorsque cette dernière était plus étroite. En d'autres termes, les objets de différentes tailles mais placés à la même orientation étaient perçus à la même orientation. Cependant, cette étude n'a pas examiné la précision avec laquelle les sujets arrivaient à percevoir la longueur de la branche des objets. Cet aspect est particulièrement

important puisque lorsque nous utilisons un outil, la précision avec laquelle nous pouvons placer l'extrémité de cet outil à la position d'une cible (chirurgien, dentiste, joueur de golf) dépend de façon critique de notre habileté à percevoir simultanément la longueur, la forme (déviations latérales) ainsi que l'orientation de l'outil par rapport à la main.

Les études conduites jusqu'à ce jour ont considéré un type très limité d'interactions main-objet. Dans ces études, les mouvements oscillatoires étaient restreints à l'articulation du poignet. Or, dans la vie de tous les jours, le mouvement d'un objet tenu dans la main se produit autour de plusieurs articulations (poignet, coude, épaule, etc.) et l'objet est déplacé le long des trois axes de l'espace tridimensionnel. Ce point est important puisque le moment d'inertie d'un objet tenu dans la main varie en fonction de la distance entre le centre de masse de l'objet et le point de rotation. Par conséquent, lorsque nous déplaçons un objet tenu dans la main, le moment d'inertie est différent pour chacune des articulations mobilisées; plus les rotations proviendront d'une articulation proximale (épaule), plus le moment d'inertie de l'objet ou du segment mobilisé sera élevé. Par conséquent, la perception des propriétés spatiales d'un objet dans les activités naturelles de la vie quotidienne est un processus beaucoup plus complexe que lors de rotations produites à une seule articulation. De plus, les conséquences sensorielles des forces produites au niveau des différentes articulations lors d'un mouvement naturel multiarticulaire sont très variées et doivent être intégrées de façon optimale pour permettre un geste précis.

2.5 Contrôle en temps réel lors de l'exécution d'atteintes manuelles

Depuis les observations pionnières de Woodworth (1899), plusieurs études ont suggéré que les mouvements d'atteinte manuelle seraient divisés en deux phases, soit une phase rapide balistique suivie d'une phase plus lente de contrôle. La première phase balistique ferait appel à des processus de planification motrice qui prennent place avant l'amorce du mouvement (feedforward). Elle assurerait le transport de la main à la proximité de la cible. La seconde phase ferait appel à des processus de contrôle et permettrait d'atteindre la cible avec précision via des mécanismes de rétroactions (feedback) (Arbib, 1981 ; Jeannerod, 1988 ; Keele et Posner, 1968 ; Meyer et al., 1988 ; Milner, 1992 ; Plamondon et Alimi, 1997 ; Woodworth, 1899). Selon ces recherches antérieures, les mouvements d'atteinte vers une cible seraient planifiés avant le début du mouvement et pourraient être corrigés relativement tardivement pendant le mouvement.

Au cours de la dernière décennie, la contribution relative des processus de planification motrice précédant le mouvement et des processus du contrôle pendant l'exécution du mouvement a fait l'objet de nombreuses controverses (Arbib, 1981 ; Desmurget et al., 1998 ; Desmurget et Grafton, 2000 ; Jeannerod, 1988 ; Paillard, 1996). Néanmoins, plusieurs données récentes indiquent que le déplacement de la main vers une cible visuelle est corrigé en temps réel pendant l'exécution des mouvements (Desmurget et al., 1999 ; Saunders et Knill, 2003, 2004 et 2005 ; Soechting et Lacquaniti, 1983 ; Brenner et Smeets, 2003 ; Proteau et al., 2009 ; Pélisson et al., 1986 ; van Sonderen et al., 1989). Qui plus est, ces mécanismes de correction opéreraient à des latences substantiellement plus courtes que les délais de temps de réaction standard pour le traitement des informations visuelles.

Plusieurs paradigmes expérimentaux différents ont permis de démontrer l'existence de ces mécanismes de corrections rapides. Par exemple, certaines preuves de la présence des corrections rapides en temps réel proviennent des expériences de sauts de cibles dans lesquelles la cible est déplacée tout juste avant ou pendant le mouvement du bras vers cette cible (Péllisson et al., 1986 ; van Sonderen et al., 1989). D'autres études ont utilisé un paradigme de saut de curseur (Saunders et Knill, 2003, 2004 et 2005 ; Soechting et Lacquaniti, 1983 ; Brenner et Smeets, 2003 ; Proteau et al., 2009). Dans ces études, la position d'un curseur représentant la main est inopinément déplacée pendant l'atteinte manuelle. Les résultats de ces différentes études de sauts de cibles et de curseur ont démontré la présence de corrections rapides de la trajectoire de la main pendant l'exécution du mouvement et ce, malgré le fait que le déplacement de la cible ou du curseur n'était pas perçu consciemment par les participants (van Sonderen et al., 1989 ; Day et Lyon, 2000 ; Desmurget et Grafton, 2000 ; Saunders et Knill, 2003, 2004 et 2005 ; Soechting et Lacquaniti, 1983 ; Brenner et Smeets, 2003 ; Proteau et al., 2009 ; Péllisson et al., 1986).

Des évidences de contrôle en temps réel ont aussi été révélées dans le contexte de paradigmes d'atteinte manuelle dans lesquelles aucune perturbation visuelle n'était introduite (Carlton, 1981 ; Gordon et Ghez, 1987 ; Meyer et al., 1988 ; Abrams et al., 1990 ; Abrams et Pratt, 1993 ; Chua et Elliot, 1993 ; Khan et al., 2006 ; Bédard et Proteau, 2004 ; Messier et Kalaska, 1999). Ces études ont simplement comparé la précision et la variation des mouvements à différents temps stratégiques durant le mouvement (sommet d'accélération, sommet de vitesse, fin du mouvement). Certaines de ces études ont utilisé des analyses corrélacionnelles. Dans ces dernières, les auteurs ont comparé les coefficients de corrélation entre les erreurs spatiales au

sommet d'accélération, au sommet de vitesse et à la fin des mouvements (Carlton et Carlton, 1984 ; Desmurget et al., 2005 ; Gordon et Ghez, 1987 ; Messier et Kalaska, 1999). Des coefficients de corrélations se rapprochant de 1 suggèrent que la précision finale des mouvements est largement déterminée par les processus centraux de planification motrice qui précèdent l'amorce du mouvement. À l'opposé, des coefficients de corrélations plus modestes suggèrent la présence d'ajustements en temps réel permettant de diminuer l'erreur initiale de planification du mouvement.

Deux études sur le contrôle en temps réel des mouvements sont particulièrement pertinentes dans le cadre de ce mémoire (Gosselin-Kessiby et al., 2008 et 2009). Ces études ont démontré que les mécanismes de contrôle en temps réel des mouvements peuvent prendre place sur la base exclusive d'informations non visuelles, définis par des informations sensorielles proprioceptives.

Les études conduites dans ce mémoire visaient à évaluer la précision avec laquelle les sensations haptiques permettent d'estimer la longueur et la forme d'objets qui s'apparentent à ceux manipulés dans la vie quotidienne. Pour ce faire, nous avons utilisé une tâche de mouvement d'atteinte manuelle vers des cibles tridimensionnelles dont les positions étaient définies par des informations haptiques. Ce paradigme expérimental nous a permis d'évaluer l'habileté de sujets à adapter les caractéristiques cinématiques du mouvement à la longueur et à la forme d'un objet tenu dans la main afin d'amener l'extrémité de ce dernier à la position d'une cible tridimensionnelle. Si les sujets sont capables de percevoir parfaitement la longueur et la forme d'un objet tenu dans la main, ils devraient ajuster les caractéristiques cinématiques de leurs mouvements en fonction des dimensions de l'objet manipulé et

ainsi maintenir le même niveau de précision spatiale que lorsqu'ils effectuent une atteinte manuelle sans objet.

Dans l'étude présente, nous voulons aussi déterminer si la contribution des mécanismes de contrôle en temps réel augmente lorsque nous effectuons des mouvements d'atteintes tridimensionnels avec un objet dans la main. En d'autres termes, est-ce que des mécanismes de contrôle rapide permettent de corriger, en temps réel, les erreurs initiales de perception des dimensions spatiales d'un objet tenu dans la main afin d'atteindre le plus précisément possible notre objectif ?

CHAPITRE 3 : MÉTHODE

3.1 Participants

Dix-neuf sujets âgés entre 18 et 30 ans ($M=22,3$) ont participé à cette étude. Dix sujets ont pris part à l'expérience 1 et neuf sujets ont pris part à l'expérience 2. Les participants étaient tous droitiers et ont utilisé leur bras droit pour effectuer les mouvements d'atteinte manuelle. La dominance manuelle était évaluée avec l'inventaire de Edinburg (Oldfield, 1971). Tous les sujets présentaient une vision normale ou corrigée. Les participants ont lu et signé le formulaire de consentement rédigé en concordance avec les politiques éthiques du comité éthique de la recherche en santé de l'Université de Montréal.

3.2 Montage expérimental et procédure

La figure 2 (en annexe) présente le montage expérimental utilisé pour les expériences 1 et 2. Ce montage permet la présentation de cibles à des positions différentes le long des trois axes (horizontal, vertical et sagittal) de l'espace tridimensionnel (3D). Les sujets étaient assis devant ce dispositif de présentation de cibles 3D qui consiste en un cube de Plexiglas (60 cm x 60 cm x 25 cm) dans lequel étaient insérées 25 tiges de bois de forme cylindrique (5 rangées et 5 colonnes) séparées par 12.5 cm. L'extrémité de chacune des tiges servait de cible (0.5 cm de diamètre). Chaque tige pouvait être déplacée par l'expérimentateur à partir de l'arrière du dispositif et être fixée à l'une des trois distances de façon reproductible (10, 15 ou 20 cm vers l'extérieur par rapport à la surface du dispositif). Ces tiges, facilement manœuvrables, permettaient la présentation de 75 cibles spatiales différentes. Pour

les deux expériences, quatre cibles étaient présentées, une à la fois, dans un ordre pseudo-aléatoire dans l'espace 3D. Les cibles étaient présentées dans deux plans de l'espace (Fig. 2 ; T1-T4). Les cibles T2 et T4 étaient séparées par 50 cm (distance horizontale) et les cibles T1 et T3 étaient séparées par 25 cm (distance verticale). Les trois cibles les plus élevées formaient un triangle sur le même plan vertical (T1, T2, T4, 20 cm de la surface du dispositif), alors que la cible la plus basse et la plus rapprochée de la position de départ des mouvements le long des axes horizontal et vertical, se situait sur un second plan (T3, 10 cm de la surface du dispositif).

Les sujets étaient assis à une distance d'un bras du montage expérimental (main ouverte; 60-80 cm), c'est-à-dire 10 cm plus éloignés que la cible la plus loin dans la direction sagittale (T3). Par conséquent, aucun des sujets ne devait effectuer une extension complète du bras pour atteindre chacune des cibles spatiales. L'alignement des cibles avec la ligne médiane du corps ou l'épaule des sujets pourrait fournir des informations explicites sur la position des cibles par rapport au corps ce qui pourrait aider les sujets à progressivement apprendre les positions des cibles durant la session expérimentale. Pour prévenir cet apprentissage, les sujets étaient positionnés de façon à ce que les cibles centrales (T1 et T3) soient à une position intermédiaire entre la ligne médiane du corps et l'épaule à une distance approximative de 45 -61 cm pour T3 et 50-60 cm pour T1. Les cibles T2 et T4 étaient équidistantes de part et d'autre de T1 et à une distance de 47-57 cm et 56-65 cm du point central entre la ligne médiane et l'épaule droite. Les mouvements d'atteinte requis pour atteindre ces cibles 3D impliquaient donc des déplacements relativement amples aux articulations de l'épaule et du coude.

Le dispositif de présentation des cibles était monté sur un rail de façon à ce que les cibles puissent être facilement déplacées de l'espace de pointage des sujets (derrière la barrière opaque, Fig. 2) entre les essais. Deux petites pièces de papier sablé (1cm²) situées sur les cuisses gauche et droite des participants ont servi de base de départ à chacun des mouvements effectués vers les cibles 3D. Ceci permettait aux sujets de facilement localiser la position de départ des mouvements au début de chacun des essais étant donné que la vision était complètement bloquée durant les séances expérimentales. Dans notre protocole, la pièce de papier placée sur la cuisse gauche servait de base de départ aux mouvements de référence (période de reconnaissance de la position d'une cible proprioceptive), alors que la pièce de papier placée sur la cuisse droite servait de base de départ aux mouvements d'atteintes manuelles effectuées vers les cibles spatiales 3D.

Dans toutes les conditions des expériences 1 et 2, l'expérimentateur déplaçait le dispositif devant le sujet afin de présenter la cible appropriée pour une période de 2 secondes et repoussait ensuite le dispositif derrière la barrière opaque afin que le sujet ne voie ou ne contacte jamais les cibles lors du mouvement d'atteinte manuelle. Après une commande verbale de l'expérimentateur, les sujets devaient amorcer une atteinte manuelle en direction de la cible 3D mémorisée. Les sujets avaient la consigne de maintenir la position finale de leur mouvement durant 1 seconde avant de ramener la main sur la base de départ. Les sujets n'avaient pas l'instruction d'initier un mouvement rapidement après le signal de l'expérimentateur, ce qui aurait influencé le temps de réaction. Tout au long de l'expérience, afin de placer l'extrémité de l'index ou l'extrémité d'un pointeur tenu entre les mains à la position de la cible le plus précisément possible, les sujets étaient encouragés à exécuter des

atteintes manuelles à vitesse naturelle constante et sans effectuer de corrections finales aux mouvements. On demandait également aux sujets de minimiser les mouvements de la tête durant la présentation de la cible et durant l'atteinte manuelle.

Au cours de ces deux expériences, en aucun moment les informations visuelles sur la position de la cible et de la main n'étaient disponibles aux sujets. Les sujets ne recevaient donc aucune information sur leur précision motrice pendant ou après l'exécution du mouvement. Par conséquent, l'erreur finale de chaque mouvement reflète prioritairement la précision des processus de planification et de contrôle du mouvement.

3.3 Conditions expérimentales

Les expériences 1 et 2 consistaient à effectuer des mouvements d'atteintes manuelles soit, dans une condition contrôle sans pointeur, soit dans des conditions dans lesquelles le sujet devait diriger l'extrémité d'un objet (pointeur) tenu dans la main à la position de la cible. Cinq pointeurs en acrylique de longueurs et de formes variables ont été utilisés. Tous les pointeurs présentaient une densité ($1,185 \text{ g/cm}^3$) et un diamètre (2 cm) identiques.

Tout au long de la durée des deux expériences, les sujets portaient un bandeau noir sur les yeux (bandeau de sommeil; Fig. 2). Ceci permettait de s'assurer qu'ils ne pouvaient pas utiliser leur vision, soit pour évaluer la position des cibles, soit pour estimer la longueur et la forme des pointeurs manipulés. Pour toutes les conditions expérimentales des expériences 1 et 2, les positions spatiales des cibles et de la main étaient donc définies sur la base exclusive des sensations haptiques. Pour ce faire, les

sujets devaient activement déplacer leur bras gauche avec une assistance minimale de l'expérimentateur; l'expérimentateur touchait légèrement le poignet du sujet afin de guider le bras du sujet dans la direction appropriée et produire une trajectoire de mouvement relativement fluide. Le sujet devait ensuite maintenir activement sa main à la position de la cible pour une durée approximative de 2 secondes sans aucune aide de l'expérimentateur, puis effectuer un mouvement afin de ramener la main à la position de départ sans assistance (mouvement de référence actif). Au signal de l'expérimentateur, les sujets devaient effectuer une atteinte manuelle 'test' vers la position mémorisée de la cible proprioceptive avec le bras droit (Mongeon et al., 2009).

Pour permettre une meilleure connaissance des caractéristiques physiques des pointeurs, une période de familiarisation avec les pointeurs de quelques secondes a été octroyée aux sujets avant le début de chacune des conditions des deux expériences. Pendant cette période, les sujets pouvaient faire osciller l'objet dans toutes les directions. Pendant la période de familiarisation et tout au long des différentes conditions expérimentales, les sujets ne pouvaient pas déplacer leur main droite le long de la tige de l'objet, ni toucher l'objet avec leur main gauche ou encore créer un contact entre l'objet et une partie de leur corps.

3.3.1 Expérience 1

L'expérience 1 comporte quatre conditions expérimentales, une condition contrôle sans pointeur et trois conditions d'atteintes manuelles avec pointeur. Trois pointeurs droits ayant des longueurs de 12,5, 17,5 et 22,5 cm respectivement ont été utilisés. Dans la condition contrôle sans pointeur, les sujets devaient effectuer une atteinte

manuelle afin de diriger l'extrémité de l'index de la main droite à la position de la cible mémorisée. Dans les conditions avec pointeur (conditions 2, 3 et 4), les sujets devaient effectuer une atteinte manuelle afin de diriger l'extrémité d'un pointeur à la position de la cible mémorisée. Dans ces conditions d'atteintes manuelles avec pointeurs, les sujets devaient donc estimer la longueur du pointeur tenu dans la main sur la base unique des sensations haptiques afin d'atteindre la cible avec précision.

Dix essais par cible étaient effectués dans chacune de ces conditions (40 essais). Chacune des conditions débutait par une période de familiarisation avec la tâche durant laquelle les sujets ont exécuté 5 à 10 mouvements vers des cibles différentes de celles utilisées durant la session expérimentale. L'intervalle entre chacun des essais successifs était d'environ cinq secondes et une pause de cinq minutes était allouée entre chacune des conditions expérimentales. L'expérience s'étale sur une durée approximative d'une heure. Les sujets n'étaient pas informés que seulement quatre cibles étaient utilisées. Afin d'introduire de l'incertitude et pour prévenir que les sujets mémorisent les positions des cibles durant la session expérimentale, 5 cibles distractives additionnelles ont été présentées après 8 essais.

3.3.2 Expérience 2

L'expérience 2 comporte trois conditions expérimentales, une condition contrôle sans pointeur et deux conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main. Deux pointeurs en forme de « L » ayant des dimensions de 17,5 cm x 12,5 cm et de 17,5 cm x 17,5 cm ont été utilisés. De façon similaire à l'expérience 1, dans les conditions petite et grande déviations latérales, les sujets devaient effectuer une atteinte manuelle et tenter de diriger l'extrémité du pointeur à la position de la cible

mémorisée. Ces conditions nécessitaient donc, à la fois, l'estimation de la longueur et de la déviation latérale du pointeur. Dans cette expérience, huit essais par cible ont été effectués. L'intervalle entre chacun des essais était encore une fois d'environ 5 secondes. Le moment d'inertie et la masse des pointeurs étant plus élevés, une pause de 2 minutes à mi-chemin de chaque condition expérimentale était effectuée dans le but de limiter la fatigue des muscles de la main droite des sujets. La pause de deux minutes servait également à repositionner le pointeur dans la main des sujets dans le cas où la prise du sujet se serait modifiée au cours des essais successifs. Une pause de 5 minutes était également allouée entre chacune des conditions expérimentales. La durée totale de l'expérience était d'environ 60 minutes.

3.4 Enregistrement de la cinématique des mouvements

Afin d'enregistrer les mouvements des sujets, des diodes à infrarouge ont été placées à l'extrémité de l'index droit (ou du pointeur tenu dans la main), sur l'apophyse styloïde de l'os ulnaire du poignet droit, sur l'épicondyle latéral du coude droit et sur les acromions des épaules droite et gauche. Les coordonnées spatiales 3D des diodes ont été enregistrées à une fréquence de 200 HZ avec un système d'analyse de mouvement (2 Optotrak[®] Certus T, Northern Digital, Inc. Waterloo, Ontario, Canada). Les coordonnées spatiales enregistrées ont été ensuite filtrées avec un filtre passe-bas Butterworth de deuxième ordre et une fréquence de coupure de 8 HZ. Un programme d'analyse maison (Matlab, The MathWorks, Inc.) a été utilisé afin de représenter graphiquement et traiter les données.

Seuls les mouvements vers les cibles étaient analysés en détail. Le début du mouvement correspondait au moment où la vitesse tangentielle atteignait 3% de la valeur maximale de vitesse et demeurait au-dessus de cette valeur jusqu'au moment

où la valeur maximale de vitesse était atteinte. De façon similaire, la fin du mouvement correspondait au moment où la vitesse tangentielle diminuait sous la valeur de 3% de la valeur maximale et demeurait sous cette valeur pour une durée de 100 ms. Les positions des cibles étaient mesurées en enregistrant les coordonnées spatiales des diodes fixées sur les cibles avant la session expérimentale.

3.5 Indices de performance

Afin de comparer la précision spatiale des sujets entre les différentes conditions expérimentales et entre les deux expérimentations, les erreurs 3D absolues, 3D variables ainsi que les erreurs commises le long de chaque axe de l'espace (horizontal=direction, vertical=élévation, sagittal=distance radiale) ont été calculées. De plus, afin d'évaluer les ajustements compensatoires produits par les sujets afin d'adapter leurs mouvements à la longueur et la forme des pointeurs, la distance parcourue par le poignet le long des trois axes de l'espace 3D a été évaluée.

Pour comparer les performances des sujets dans les différentes conditions, les erreurs 3D absolues, 3D variables et de direction (direction, élévation et distance radiale) ont été calculées pour les mouvements dirigés vers chaque position de cible par rapport à un système de référence cartésien. Les erreurs 3D absolues ont été calculées comme la distance 3D dans l'espace entre la position finale de l'extrémité de l'index/pointeur et la position de la cible (fig. 3 en annexe). Les valeurs de l'erreur 3D absolue fournissent une mesure de la taille moyenne des erreurs au point final du mouvement lors des atteintes manuelles vers les différentes cibles. L'erreur 3D variable (fig. 3) a été calculée comme l'écart type global de la position du bout du doigt pour tous les essais vers une cible prédéterminée et a été calculée en utilisant la formule suivante :

erreur variable 3D = racine carré ($[SD (d_x)]^2 + [SD (d_y)]^2 + [SD (d_z)]^2$) où SD est l'écart type, d_x , d_y et d_z sont les différences entre les coordonnées de la position de la cible et celles de la position finale de l'index/pointeur respectivement dans les directions x (latérale), y (antérieure/postérieure) et z (vertical). L'écart type donne une mesure de dispersion des positions finales des atteintes manuelles comparées à la moyenne de la position finale des atteintes manuelles dirigées vers chaque emplacement de cible (Messier et al. 2003).

Pour ce qui est des erreurs commises le long de chacun des axes, les erreurs horizontales (l'erreur de direction, droite (+)), verticales (l'erreur d'élévation, au-dessus (+)) et sagittales (l'erreur de distance radiale, dépasser (+)) ont été calculées comme la différence entre les coordonnées de la cible et celles de l'extrémité de l'index/pointeur de façon horizontale, verticale et sagittale respectivement (erreurs signées).

Les erreurs absolues de direction, d'élévation et de distance radiale sont les valeurs absolues des erreurs de direction, d'élévation et de distance radiale pour chacun des mouvements vers chacune des cibles. Les erreurs variables de direction, d'élévation et de distance radiale sont les écarts types des erreurs obtenues pour les mouvements dirigés vers chacune des positions de cible.

Finalement, les déplacements effectués par le poignet ont été calculés comme la différence entre la position x, y et z du poignet à la fin des atteintes manuelles dirigés vers les cibles et la position initiale en x, y et z du poignet avant l'amorce des mouvements.

3.6 Analyse statistique

Des ANOVA à mesures répétées (conditions x cibles) séparées pour chacune des expériences ont été effectuées sur les erreurs 3D absolues et variables ainsi que sur les composantes des erreurs 3D (direction, élévation et distance radiale) afin d'évaluer la précision avec laquelle les sujets étaient capables d'estimer la longueur (expérience 1) et la forme (expérience 2) des pointeurs tenus dans la main droite lors des mouvements d'atteintes manuelles.

Des ANOVA à mesures répétées (conditions x cibles) séparées pour chacune des expériences ont également été appliquées sur plusieurs autres caractéristiques des mouvements; les déplacements du poignet le long des trois axes, les temps de mouvement, les pourcentages de décélération ainsi que les valeurs de vitesse maximale. Ces analyses permettent de mieux comprendre les stratégies utilisées par les sujets lors des mouvements d'atteintes manuelles effectuées dans les différentes conditions.

Des analyses a post priori (post hoc) ont été effectuées en utilisant les corrections de Bonferroni.

De plus, des coefficients de détermination ont été calculés entre les différentes mesures d'erreurs spatiales calculées à la position du sommet de vitesse et à la position finale du mouvement pour chacun des essais de chacune des conditions des deux premières expériences.

Pour l'ensemble des expériences, afin de présenter les principaux résultats de façon claire et concise, seuls les effets principaux de conditions et les interactions entre les facteurs conditions et cibles seront rapportés.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS

4.1 Expérience 1 : Adaptation des mouvements d'atteinte manuelle à la longueur d'un objet tenu dans la main sans information visuelle

L'objectif de l'expérience 1 était d'évaluer la précision avec laquelle de jeunes adultes en santé peuvent adapter des mouvements d'atteinte manuelle à la longueur d'un objet tenu dans la main (pointeurs : 12,5 cm, 17,5 cm et 22,5 cm), uniquement sur la base d'informations haptiques. Pour ce faire, nous avons comparé la précision spatiale des sujets lorsqu'ils effectuaient des mouvements d'atteinte manuelle vers des cibles proprioceptives 3D en tenant un pointeur à la main avec celle des mouvements effectués dans la condition contrôle sans pointeur.

4.1.1 Erreurs 3D absolues et variables

La figure 4A présente la moyenne des erreurs 3D absolues commises par les sujets lors des mouvements d'atteinte dirigés vers les quatre cibles 3D dans quatre conditions variant la longueur des pointeurs utilisés: 1) sans pointeur, 2) petit pointeur = 12.5 cm, 3) moyen pointeur = 17.5 cm et 4) long pointeur = 22.5 cm. Les erreurs 3D absolues des sujets montrent une augmentation systématique à travers les quatre conditions expérimentales. Cependant, l'augmentation de l'erreur 3D absolue demeure petite lorsqu'elle est comparée à l'augmentation de la longueur des pointeurs. L'augmentation est seulement de 2,13 cm de la condition sans pointeur à la condition petit pointeur, de 1,09 cm de la condition petit pointeur à la condition moyen pointeur et finalement de 1,57 cm de la condition moyen pointeur à la condition long pointeur. Ainsi, entre la condition contrôle sans pointeur et la

condition d'atteinte manuelle avec le long pointeur, nous retrouvons une augmentation de l'erreur 3D absolue de seulement 4,79 cm.

L'ANOVA effectuée sur les erreurs 3D absolues supporte ces tendances moyennes. Elle indique un effet principal de condition ($F_{(1,9)}=14,198$; $p<0,05$). L'analyse post hoc révèle que les sujets ont été significativement moins précis dans les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main en comparaison avec la condition contrôle sans pointeur où ils devaient effectuer un mouvement de bras afin de placer l'index à la position de la cible ($p<0,05$). Cependant, il n'y a pas de différence significative entre la taille des erreurs 3D absolues commises dans les trois conditions de pointeurs, malgré une différence de 10 cm entre le pointeur le plus court et le pointeur le plus long. Ces résultats suggèrent que les sujets ont, au moins en partie, adapté les caractéristiques cinématiques de leurs mouvements afin de compenser pour la longueur des pointeurs.

La figure 4B (en annexe) présente la grande moyenne des erreurs 3D variables commises par les sujets lors des mouvements dirigés vers les quatre cibles 3D dans les quatre conditions expérimentales. De façon analogue aux erreurs 3D absolues, les moyennes des erreurs variables sont plus grandes pour les trois conditions d'atteinte manuelle avec un pointeur tenu dans la main que pour la condition contrôle sans pointeur. Qui plus est, la condition long pointeur est associée aux plus grandes erreurs variables 3D. Cependant, contrairement aux erreurs 3D absolues, les erreurs variables 3D ne montrent pas d'augmentation systématique en fonction de la longueur des pointeurs utilisés. De façon consistante avec ces observations, l'ANOVA indique un effet principal de conditions sur les erreurs variables 3D

($F_{(1,9)}=9,067$; $p<0,05$). L'analyse post-hoc confirme que, dans la condition long pointeur dans laquelle les plus grands biais spatiaux devaient être compensés, les sujets étaient significativement plus variables que dans la condition contrôle sans pointeur ($p<0,05$). Aucune autre différence ne s'est avérée significative entre les conditions, suggérant ainsi que les adaptations des mouvements produits par les sujets ont permis de maintenir le même niveau de variabilité 3D dans les conditions petit et moyen pointeurs.

4.1.2 Composantes de l'erreur 3D

Erreurs constantes et absolues de distance radiale, de direction et d'élévation

Afin d'évaluer comment l'exécution d'atteinte manuelle avec des objets de différentes longueurs affecte les erreurs spatiales commises le long des trois axes de l'espace 3D, nous avons effectué des ANOVA séparées sur les erreurs constantes et absolues de distance radiale, de direction et d'élévation.

Les figures 5A et 5B (en annexe) présentent respectivement la moyenne des erreurs constantes et absolues de distance radiale, de direction et d'élévation pour tous les sujets et toutes les cibles à travers les quatre conditions expérimentales. La taille des erreurs constantes et absolues moyennes de distance radiale (constante = 2,03 cm; absolue = 4,40 cm), de direction (constante = -0,03 cm ; absolue = 4,37 cm) et d'élévation (constante = -2,89 cm ; absolue = 4,36 cm) est relativement similaire dans la condition contrôle sans pointeur. Cependant, ces erreurs sont influencées de façon différente lors des conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main.

Les erreurs constantes de distance radiale sont de signe positif et augmentent de façon systématique de la condition contrôle sans pointeur à la condition long pointeur. Ce résultat suggère que les sujets sous-estiment, en moyenne, la longueur des différents pointeurs (Fig. 5A). Les erreurs de distance radiale constantes et absolues montrent un patron très similaire à celui des erreurs 3D absolues (Fig. 4A). L'erreur de distance radiale absolue augmente de 2,6 cm de la condition sans pointeur à la condition petit pointeur et de 2,9 cm entre la condition petit pointeur et long pointeur. Notons, encore une fois, que cette augmentation est petite en comparaison à l'augmentation de la longueur des pointeurs tenus par les sujets.

Contrairement aux erreurs de distance radiale, les valeurs d'erreurs constantes et absolues de direction et d'élévation demeurent très similaires dans toutes les conditions expérimentales. En moyenne, les sujets terminent leurs mouvements à droite et à gauche de la cible pour toutes les conditions. Par conséquent, les erreurs constantes de direction s'annulent entre elles lorsqu'elles sont moyennées, ce qui explique les valeurs d'erreurs constantes de direction très près de zéro (Fig. 5A). Par ailleurs, les erreurs constantes d'élévation démontrent la tendance moyenne des sujets à sous-estimer la position verticale des cibles dans les quatre conditions expérimentales (Fig. 5A).

Ces tendances sont confirmées par l'ANOVA qui montre un effet significatif de condition sur les erreurs constantes de distance radiale ($F_{(1,9)}=13,899$; $p<0,05$). L'analyse post-hoc indique que les erreurs constantes de distance radiale commises par les sujets dans les conditions moyen et long pointeurs sont significativement plus grandes que celles commises dans la condition contrôle sans pointeur. Cependant, il

n'y a pas de différence significative entre la condition contrôle sans pointeur et la condition petit pointeur ainsi qu'entre la condition petit pointeur et les conditions moyen et long pointeurs. De plus, l'ANOVA ne révèle aucun effet significatif de condition au niveau des erreurs constantes et absolues de direction ($F(1,9)=1,302$; $p>0,05$; $F(1,9)=1,222$; $p>0,05$) et d'élévation ($F(1,9)=1,013$; $p>0,05$; $F(1,9)=,494$; $p>0,05$).

En somme, bien que l'atteinte manuelle d'une cible avec un pointeur tenu dans la main produise un biais spatial dans les trois axes de l'espace 3D, nos résultats suggèrent que les erreurs 3D absolues commises lors des mouvements effectués avec un pointeur tenu dans la main sont largement expliquées par des erreurs produites le long de l'axe sagittal (distance radiale).

Erreur variable de distance radiale, de direction et d'élévation

La figure 6 (en annexe) présente la moyenne des erreurs variables de distance radiale, de direction et d'élévation pour l'ensemble des sujets à travers les quatre cibles et les quatre conditions expérimentales. Les erreurs variables de direction augmentent de façon graduelle d'une condition à l'autre. Cette tendance n'est pas retrouvée au niveau des erreurs variables de distance et d'élévation. Toutefois, les erreurs variables de distance radiale et d'élévation sont, en moyenne, plus grandes dans les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main.

De façon similaire aux analyses des erreurs constantes et absolues, les ANOVA appliquées sur les erreurs variables des différentes composantes du mouvement indiquent un effet principal de conditions uniquement pour la variabilité des erreurs

de distance radiale ($F_{(1,9)}=14,198$; $p<0,05$). Ces dernières sont significativement plus élevées dans les conditions petit et long pointeurs en comparaison aux erreurs variables de distance radiale commises dans la condition contrôle sans pointeur ($p<0,05$).

4.1.3 Ajustements produits le long des trois axes de l'espace 3D

Nous avons évalué la distance parcourue par le poignet le long des trois axes de l'espace 3D pour les quatre conditions expérimentales. Notre raisonnement était le suivant: si les sujets ont adapté leurs mouvements à la longueur des différents pointeurs, le déplacement 3D du poignet devrait être plus court pour les conditions d'atteintes manuelles avec pointeurs que pour la condition contrôle sans pointeur. Les résultats des différentes ANOVA supportent cette hypothèse. Tout d'abord, ils révèlent un effet principal de condition sur les déplacements 3D du poignet ($F_{(1,9)}=17,507$, $p<0,05$). Il existe une différence significative entre le déplacement du poignet lors des mouvements effectués dans la condition contrôle sans pointeur et les trois autres conditions d'atteinte manuelle avec un pointeur tenu dans la main ($p<0,05$). Cette analyse montre également une différence significative entre le déplacement 3D du poignet produit dans la condition long pointeur et les conditions petit et moyen pointeurs ($p<0,05$). Cependant, il n'existe pas de différence significative entre la taille du déplacement du poignet produit dans les conditions petit et moyen pointeurs ($p>0,05$). Cette observation est étonnante puisqu'il existe une différence de longueur de 5 cm entre le petit et le moyen pointeur ainsi qu'entre le moyen et le long pointeur. Ce résultat pourrait refléter la plus grande difficulté des sujets à percevoir de façon précise la longueur d'un pointeur et/ou à produire des

ajustements fins du mouvement afin de compenser la longueur estimée d'un pointeur lorsque ce dernier est plus court. Nous reviendrons sur ce point dans la discussion.

Le tableau 1 (en annexe) présente le déplacement moyen du poignet le long des axes sagittal (distance radiale), horizontal (direction) et vertical (élévation) pour chacune des cibles pour l'ensemble des sujets de l'expérience 1. Notez que la distance parcourue par le poignet lors des mouvements vers chacune des cibles est plus grande le long de l'axe vertical. En moyenne, le déplacement du poignet diminue de façon systématique le long des axes sagittal et vertical à mesure que la longueur des pointeurs utilisés pour atteindre les cibles allonge. Cependant, la distance horizontale (direction) parcourue par le poignet demeure inchangée à travers les conditions d'atteintes manuelles avec pointeurs.

Malgré une valeur moyenne plus grande de déplacement du poignet le long de l'axe sagittal dans la condition d'atteintes manuelles sans pointeur, l'ANOVA n'a pas révélé de différence significative entre les conditions ($F_{(1,9)}=2,172$; $p>0,05$). L'ANOVA a cependant révélé une interaction significative entre les facteurs condition et cible ($F_{(1,9)}=3,563$; $p<0,05$). L'analyse post-hoc indique que les déplacements du poignet le long de l'axe sagittal (distance radiale) de la condition sans pointeur sont significativement plus longs que ceux des conditions moyen et long pointeurs lorsque les atteintes manuelles sont dirigées vers la cible 2 ($p<0,05$). Le déplacement du poignet est également significativement plus long pour la condition contrôle sans pointeur que pour la condition long pointeur pour les atteintes manuelles dirigées vers la cible 3 ($p<0,05$).

Lorsque l'ANOVA est appliquée au déplacement du poignet le long de l'axe vertical, elle indique un effet de condition ($F_{(1,9)}=13,070$; $p<0,05$). Les sujets ont effectué des déplacements significativement plus longs pour la condition contrôle sans pointeur que pour les conditions petit et long pointeurs. La différence entre la condition sans pointeur et moyen pointeur n'a cependant pas atteint le niveau de signification ($p=0,056$). De plus, de façon consistante avec les tendances moyennes observées, l'analyse statistique ne révèle aucune différence significative entre le déplacement du poignet le long de l'axe horizontal entre les quatre conditions d'atteinte manuelle. Ces observations démontrent que les sujets ont produit des ajustements partiels afin d'adapter leurs mouvements à la longueur des pointeurs tenus dans la main. Bien que ces ajustements aient pris place le long des axes sagittal et vertical, les ajustements ont été plus importants le long de l'axe vertical, là où les déplacements de la main nécessaires à l'atteinte des cibles 3D étaient les plus grands. De plus, ces ajustements significatifs ont permis aux sujets de maintenir le même niveau de précision spatiale le long de l'axe vertical dans les quatre conditions expérimentales de cette expérience.

4.1.4 Planification motrice et contrôle en temps réel

Afin de déterminer si les ajustements observés le long des trois axes de l'espace 3D se produisent largement avant l'amorce du mouvement ou s'ils se déroulent en temps réel durant l'exécution du mouvement, nous avons d'abord examiné la structure temporelle des mouvements effectués dans les quatre conditions d'atteinte manuelle. Les temps de mouvements sont très similaires entre les quatre conditions (sans pointeur = 824,52 ms; petit pointeur = 801,97 ms ; moyen pointeur = 746,27 ms; long pointeur = 871,85 ms; ($F_{(1,9)}=1,323$; $p>0,05$). Cependant, en moyenne, les sujets ont

utilisé une vitesse tangentielle maximale plus petite dans les conditions d'atteintes manuelles avec pointeurs en comparaison à la condition contrôle sans pointeur (sans pointeur = 140,88 cm/s; petit pointeur = 125,91 cm/s ; moyen pointeur = 99,68 cm/s; long pointeur = 132,19 cm/s). Cette différence ne s'est toutefois pas avérée significative ($F_{(1,9)}=2,745$; $p>0,05$). L'analyse de la proportion du mouvement en phase de décélération montre que la durée relative de la phase de décélération des mouvements des sujets est plus longue, en moyenne, dans la condition contrôle sans pointeur que dans les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main. De plus, la durée relative de la phase de décélération diminue légèrement mais de manière systématique en fonction de la longueur du pointeur utilisé (sans pointeur = 65.6% ; petit pointeur = 64,9% ; moyen pointeur = 63,1% ; long pointeur = 62,9%). L'ANOVA confirme cette tendance et révèle un effet significatif de condition ($F_{(1,9)}= 3,785$; $p<0,05$). Toutefois, seule la condition moyen pointeur est significativement différente de la condition contrôle sans pointeur ($P<0.05$).

L'observation de phases de décélération similaires ou écourtées dans les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main suggère que les sujets n'utilisent pas plus de corrections en temps réel dans les conditions d'atteintes manuelles avec pointeur que dans la condition contrôle sans pointeur. Afin de tester plus en détail cette hypothèse, nous avons évalué la relation entre les erreurs finales d'atteintes manuelles (à proximité de la cible) et celles produites au moment où la vitesse tangentielle du déplacement de la main est maximale. Cette analyse corrélationnelle permet de déterminer si la précision spatiale finale des mouvements est largement prédite par les caractéristiques spatiales (cinématiques) du début du mouvement.

La figure 7 (en annexe) présente la moyenne des coefficients de détermination (R^2) entre l'erreur au sommet de vitesse et l'erreur à la position finale du mouvement (erreurs 3D absolues, de direction, de distance radiale et d'élévation) à travers toutes les cibles et tous les sujets. La fraction au-dessus de chacune des barres de l'histogramme présente la proportion des coefficients de corrélation significatifs ($p < 0.05$). Dans l'ensemble, les coefficients de détermination sont relativement modestes ($< 0,50$) pour toutes les variables dépendantes évaluées et pour toutes les conditions expérimentales. Ce résultat suggère que des corrections en temps réel ont pris place dans toutes les conditions d'atteintes manuelles de cette expérience. Qui plus est, de façon consistante avec les données temporelles présentées ci-haut, il n'y a pas de variation systématique entre les coefficients de détermination obtenus pour les différentes conditions expérimentales de cette expérience. Cette observation qualitative est supportée par les différentes ANOVA qui ne révèlent aucun effet significatif de condition pour les quatre types d'erreurs évaluées.

Ensemble, les résultats de l'expérience 1 suggèrent que les sujets ont produit des ajustements partiels mais significatifs afin de compenser la longueur des pointeurs et amener l'extrémité de ces derniers le plus près possible des cibles. Toutefois, il ne semble pas que ces adaptations des caractéristiques cinématiques des mouvements en fonction de la longueur des pointeurs tenus dans la main aient fait intervenir des stratégies différentes de contrôle de celles utilisées lors des atteintes manuelles effectuées dans la condition contrôle sans pointeur.

4.2 Expérience 2: Adaptation des mouvements d'atteinte manuelle à la forme d'un objet tenu dans la main sans information visuelle

L'objectif de l'expérience 2 était d'évaluer la précision avec laquelle de jeunes adultes en santé peuvent adapter des mouvements d'atteinte manuelle à la longueur et la forme d'un objet tenu dans la main, uniquement sur la base d'informations haptiques. Nous avons utilisé deux pointeurs en forme de « L ». Ces derniers possèdent un manche de 17,5 cm et une déviation latérale de 12,5 cm et de 17,5 cm respectivement. De façon similaire à l'expérience 1, nous avons comparé la précision spatiale des sujets lorsqu'ils effectuaient des mouvements d'atteinte manuelle vers des cibles proprioceptives 3D en tenant un pointeur dans la main aux mouvements effectués dans la condition contrôle sans pointeur.

4.2.1 Erreurs 3D absolues et variables

La figure 8A (en annexe) présente la grande moyenne des erreurs 3D absolues pour tous les mouvements dirigés vers les quatre cibles 3D pour l'ensemble des sujets dans les trois conditions expérimentales : 1) sans pointeur, 2) petite déviation latérale (longueur = 17.5 cm, déviation latérale = 12.5 cm) et 3) grande déviation latérale (longueur = 17.5 cm, déviation latérale = 17.5 cm). De façon similaire à l'expérimentation 1, les moyennes des erreurs 3D absolues sont supérieures pour les deux conditions avec pointeur à celles de la condition contrôle sans pointeur. Cependant, les erreurs 3D absolues sont sensiblement les mêmes pour les deux conditions avec pointeur. Les erreurs 3D absolues pour la condition petite déviation latérale sont de 3,4 cm plus grandes que pour la condition contrôle sans pointeur alors que pour la condition grande déviation latérale nous retrouvons une différence

de 3,1 cm avec la condition contrôle sans pointeur. Il est intéressant de noter, encore une fois, que l'augmentation de l'erreur 3D absolue dans les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main est très petite en comparaison aux dimensions de ces pointeurs. Qui plus est, il est étonnant, qu'en moyenne, les erreurs 3D absolues soient légèrement plus petites pour la condition grande déviation latérale que pour la condition petite déviation latérale.

Ces observations sont confirmées par l'ANOVA qui révèle un effet principal de condition sur les erreurs 3D absolues ($F(1,8)=10,555$; $p<0,05$). Les sujets ont été moins précis dans les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main en comparaison à la condition contrôle sans pointeur où ils devaient amener l'index à la position de la cible ($p<0,05$). Il n'existe cependant pas de différence entre les deux conditions de pointeurs ($p>0,05$).

La figure 8B (en annexe) représente la grande moyenne des erreurs 3D variables commises par les sujets lors des mouvements dirigés vers les quatre cibles 3D dans les trois conditions expérimentales. La grande moyenne des erreurs variables 3D montre des tendances similaires à celles de l'expérience 1. Les deux conditions d'atteintes manuelles avec pointeurs engendrent des moyennes de variabilité plus grandes que la condition contrôle sans pointeur. Il n'y a cependant pas d'augmentation systématique de la variabilité avec l'augmentation de la déviation latérale des pointeurs.

De façon consistante avec ces observations, l'ANOVA indique un effet principal de condition ($F(1,8)=9,11$; $p<0,05$). L'analyse post-hoc révèle une différence

significative entre la condition sans pointeur et les deux conditions d'atteintes manuelles avec pointeur ($p < 0,05$). Elle révèle également une interaction significative entre les facteurs condition et cible ($F(1,8) = 9,116$; $p < 0,05$). L'analyse post-hoc indique aussi une différence significative entre la condition contrôle et les conditions d'atteinte manuelle avec pointeurs pour les cibles 1, 2 et 3 uniquement ($p < 0,05$).

4.2.2 Composantes de l'erreur 3D

Erreur constante et absolue de distance radiale, de direction et d'élévation

Les figures 9A et 9B (en annexe) présentent respectivement les grandes moyennes des erreurs constantes et absolues de distance radiale, de direction et d'élévation pour tous les sujets et toutes les cibles à travers les trois conditions de l'expérience 2. De façon similaire à l'expérience 1, les erreurs constantes de distance radiale sont plus grandes pour les conditions avec pointeur que pour la condition contrôle sans pointeur (fig. 9A en annexe). En fait, la condition grande déviation latérale est associée à des erreurs de distance radiale 1,3 cm plus petites que la condition petite déviation latérale, tandis que la différence entre la condition contrôle sans pointeur et la condition grande déviation latérale est de 3,5 cm. Les erreurs de distance radiale absolues (9B en annexe) montrent un patron très similaire à celui des erreurs constantes (9A en annexe).

Les erreurs constantes de direction augmentent de façon systématique d'une condition à l'autre. Cependant, ces erreurs directionnelles demeurent très petites (fig. 9A en annexe). Les sujets ont commis, en moyenne, des erreurs de 0,2 cm lors de la condition contrôle sans pointeur. Ces erreurs ont augmenté à 1,5 cm pour la

condition petite déviation latérale pour plafonner à 2 cm pour la condition grande déviation latérale. La tendance moyenne des sujets est de terminer leurs mouvements légèrement à la droite des cibles. Les erreurs de direction absolues demeurent, elles aussi, relativement petites à travers les trois conditions et montrent une augmentation graduelle en fonction de la taille de la déviation latérale des pointeurs.

Les erreurs constantes d'élévation démontrent la tendance des sujets à diriger leur main en dessous des cibles lors de la condition sans pointeur et au-dessus des cibles dans les conditions petite et grande déviations latérales (fig. 9A en annexe). Cependant, la taille des erreurs d'élévation absolues demeure sensiblement la même d'une condition à l'autre (fig. 9B en annexe).

Ces tendances sont confirmées par l'ANOVA qui montre un effet de condition sur les erreurs constantes et absolues de distance radiale ($F(1,8)=13,730$; $p<0,05$) ($F(1,8)=9,256$; $p<0,05$). Les analyses post-hoc indiquent que les erreurs constantes et absolues de distance radiale dans les conditions petite et grande déviations latérales sont significativement plus grandes que celles de la condition contrôle sans pointeur ($p<0,05$). Un effet principal de condition est aussi retrouvé au niveau des erreurs constantes d'élévation ($F(1,8)=18,134$; $p<0,05$). Aucun effet de condition n'est toutefois retrouvé sur les erreurs d'élévation absolues ($F(1,8)=0,241$; $p>0,05$), ainsi que sur les erreurs constantes et absolues de direction ($F(1,8)=1,528$; $p>0,05$) ($F(1,8)=2,735$; $p>0,05$). Ces résultats sont étonnants puisque que, contrairement à l'expérience 1, la déviation latérale des pointeurs utilisés dans l'expérience 2 devrait produire des biais spatiaux aussi importants le long de l'axe sagittal (distance radiale) que le long de l'axe horizontal (direction). Il semble donc que les ajustements du

mouvement qui ont pris place afin de compenser pour la forme des pointeurs (longueur et déviation latérale) ont affecté différemment les axes horizontal, vertical et sagittal de l'espace.

Erreur variable de distance radiale, de direction et d'élévation

La figure 10 (en annexe) présente la grande moyenne des erreurs 3D variables de distance radiale, de direction et d'élévation pour l'ensemble des sujets à travers les quatre cibles utilisées et les trois conditions expérimentales de l'expérience 2. Les erreurs variables de distance radiale augmentent de façon graduelle d'une condition à l'autre. Cette tendance n'est pas retrouvée au niveau des erreurs variables de direction et d'élévation. Toutefois, les erreurs variables de direction et d'élévation sont, en moyenne, plus grandes dans les conditions d'atteintes manuelles avec pointeurs. De façon intéressante, les erreurs variables de direction et d'élévation sont légèrement plus petites pour la condition grande déviation latérale que pour la condition petite déviation latérale.

L'ANOVA supporte ces observations. Elle révèle un effet principal de condition pour les erreurs variables de distance radiale ($F(1,8)=5,064$; $p<0,05$). La condition grande déviation latérale produit significativement plus de variabilité le long de l'axe sagittal (distance radiale) que la condition sans pointeur. L'ANOVA indique également un effet principal de condition ($F(1,8)=6,529$; $p<0,05$) sur la variabilité le long de l'axe horizontal (direction). Les erreurs variables de direction des conditions petite et grande déviations latérales sont significativement plus élevées que celles de la condition contrôle sans pointeur.

4.2.3 Ajustements produits le long des trois axes de l'espace 3D

Comme pour l'expérience 1, nous avons calculé la distance de déplacement du poignet le long des trois axes de l'espace 3D afin d'évaluer les ajustements produits par les sujets afin de compenser les biais spatiaux introduits par l'utilisation de pointeurs (longueur et déviation latérale des pointeurs) et placer l'extrémité de ces derniers le plus près possible des cibles 3D. Le tableau 2 présente le déplacement moyen du poignet le long des axes sagittal (distance radiale), horizontal (direction) et vertical (élévation) pour chacune des cibles et pour l'ensemble des sujets. De façon similaire à l'expérience 1, la distance parcourue par le poignet lors des mouvements vers chacune des cibles est plus grande le long de l'axe vertical. De plus, en moyenne, le déplacement vertical du poignet diminue graduellement de la condition sans pointeur à la condition grande déviation latérale. Cependant, contrairement à l'expérience 1, le déplacement du poignet le long de l'axe sagittal (distance radiale) n'est pas plus important dans la condition contrôle sans pointeur que dans les deux conditions d'atteintes manuelles avec pointeur. Par ailleurs, le déplacement du poignet le long de l'axe horizontal (direction) varie en fonction de la position des cibles et de la taille de la déviation des pointeurs. Par exemple, le déplacement horizontal moyen augmente lors des mouvements dirigés vers la cible 4 (cible à gauche), tandis que le déplacement horizontal moyen diminue lors des mouvements dirigés vers la cible 2 (cible à droite). Étant donné que la déviation latérale des pointeurs pointe vers la droite, ces ajustements permettent de placer l'extrémité du pointeur à proximité de la cible.

Ces tendances sont confirmées par les différentes ANOVA. Premièrement, il existe un effet principal de conditions sur le déplacement vertical du poignet

($F(1,9)=13,070$; $p<0,05$). L'analyse post-hoc indique que les sujets ont effectué des déplacements significativement plus longs dans la condition contrôle sans pointeur que dans les conditions petite et longue déviations latérales ($p>0,05$). Deuxièmement, l'ANOVA n'a révélé aucun effet principal de condition sur l'amplitude du déplacement du poignet le long de l'axe sagittal (distance radiale); ($F(1,8)=2,093$; $p>0,05$). Cependant, il existe une interaction significative entre les facteurs condition et cible ($F(1,8)=3,546$; $p<0,05$). L'analyse post-hoc indique qu'au niveau de la cible 2, le déplacement du poignet le long de l'axe sagittal est significativement plus long pour la condition petite déviation latérale que pour la condition contrôle sans pointeur ($p<0,05$). Troisièmement, de façon consistante avec les tendances moyennes présentées au tableau 2, l'ANOVA ne révèle pas d'effet principal de condition ($F(1,8)=4,107$; $p=0,06$) sur le déplacement horizontal du poignet. Elle indique plutôt une interaction significative entre les facteurs condition et cible ($F(1,8)=7,681$; $p<0,05$). Les mouvements dirigés vers les cibles 1 et 4 présentent des déplacements du poignet significativement plus grands pour la condition grande déviation latérale que pour la condition contrôle sans pointeur ($p<0,05$). Pour atteindre ces cibles avec les pointeurs, la main devait se déplacer à gauche de la cible et par conséquent parcourir une plus grande distance horizontale que dans la condition contrôle sans pointeur. À l'opposé, le déplacement du poignet lors des mouvements vers la cible 2 était significativement plus court dans les conditions petite et grande déviations latérales que dans la condition contrôle sans pointeur ($P<0,05$). Lors des mouvements vers la cible 2, la déviation latérale des pointeurs diminuait la distance horizontale à parcourir.

En somme, ces résultats démontrent que les sujets ont produit divers ajustements le long des trois axes de l'espace 3D afin de compenser pour les biais spatiaux introduits par l'utilisation des pointeurs et ainsi placer l'extrémité de ces derniers le plus près des cibles.

4.2.4 Planification motrice et contrôle en temps réel

Nous avons évalué la structure temporelle des mouvements afin de déterminer si les stratégies de contrôle utilisées par les sujets étaient similaires dans la condition d'atteinte manuelle sans pointeur et les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main. Les sujets étaient, en moyenne, plus lents lorsqu'ils effectuaient les atteintes manuelles avec un objet en forme de «L » à la main (sans pointeur = 672,00 ms ; petite déviation latérale = 752,66 ms ; grande déviation latérale = 754,83 ms). L'ANOVA indique un effet principal de condition ($F_{(1,8)}=7,590$; $p<0,05$), ainsi qu'une interaction entre les facteurs condition et cible ($F_{(1,8)}=3,344$; $p<0,05$). L'analyse post-hoc révèle qu'il existe une différence significative entre la condition contrôle sans pointeur et la condition grande déviation latérale uniquement pour les cibles 3 et 4. De plus, la condition contrôle sans pointeur est significativement différente de la condition petite déviation latérale lorsque les atteintes manuelles sont dirigées vers les cibles 1, 2 et 4 ($p<0,05$).

De façon consistante avec ces observations, les valeurs moyennes de vitesse maximale du déplacement de la main étaient plus grandes pour la condition contrôle sans pointeur que pour les conditions avec pointeur (sans pointeur = 137,8 cm/s ; petite déviation latérale = 116,6 cm/s ; grande déviation latérale = 115,5 cm/s). L'ANOVA confirme cette interaction de condition ($F_{(1,8)}=30,939$; $p<0,05$). Les

valeurs de vitesse maximale sont donc significativement plus élevées pour la condition contrôle que pour les conditions petite déviation latérale et grande déviation latérale ($p < 0,05$).

L'analyse de la proportion du mouvement en phase de décélération montre que la durée relative moyenne de la phase de décélération des mouvements des sujets est légèrement plus longue (non significative) pour la condition contrôle sans pointeur (60%) que pour les conditions petite déviation latérale (59,5%) et longue déviation latérale (58,9%) ($p > 0,05$). De façon similaire à l'expérience 1, l'observation de phases de décélération similaires ou écourtées dans les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main suggère que les sujets n'utilisent pas plus de corrections en temps réel dans les conditions d'atteintes manuelles avec pointeur que dans la condition contrôle sans pointeur.

Une analyse corrélacionnelle entre les erreurs finales d'atteintes manuelles et celles calculées au moment où la vitesse tangentielle du déplacement de la main est maximale a permis d'évaluer cette hypothèse plus en détail. La figure 11 (en annexe) présente la grande moyenne des coefficients de détermination (R^2) entre l'erreur au sommet de vitesse et l'erreur à la position finale du mouvement (erreurs 3D absolues, erreurs constantes de direction, de distance radiale et d'élévation) à travers tous les sujets et toutes les cibles. De façon similaire à l'expérience 1, les coefficients de détermination sont relativement modestes (entre 0,36 et 0,60) à travers les différentes conditions et variables dépendantes évaluées. De plus, ces derniers ne montrent pas de variation systématique générale à travers les conditions d'atteintes manuelles.

On note cependant, qu'en moyenne, le coefficient de détermination obtenu pour la condition contrôle sans pointeur est inférieur à ceux obtenus pour les conditions d'atteintes manuelles avec pointeur au niveau des erreurs de distance radiale. Les fractions au-dessus des valeurs moyennes de coefficients de détermination (distance radiale) indiquent que ces coefficients de détermination plus élevés sont associés à un plus grand nombre de corrélations significatives. L'ANOVA supporte cette tendance et indique un effet principal de condition sur les coefficients de détermination obtenus pour les erreurs de distance radiale ($F(1,8)=4,594$; $p<0,05$). L'analyse post-hoc indique une différence significative entre la condition contrôle sans pointeur et les deux conditions avec pointeurs ($p<0,05$). Les coefficients plus modestes observés dans la condition contrôle sans pointeur en comparaison à ceux obtenus dans les deux conditions d'atteinte manuelle avec pointeur suggèrent que les corrections en temps réel pour compenser les biais spatiaux en distance, soit moins importantes dans les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main.

En somme, les résultats de l'expérience 2 suggèrent que les sujets ont produit des ajustements partiels mais significatifs le long des trois axes de l'espace 3D afin de compenser les biais spatiaux (en distance, en élévation et en direction) introduits par les pointeurs en forme de 'L'. Par ailleurs, bien que les sujets aient diminué la vitesse de leurs mouvements lors des atteintes manuelles avec un pointeur, il ne semble pas que ces adaptations des caractéristiques cinématiques des mouvements en fonction de la forme des pointeurs tenus dans la main, s'expliquent prioritairement par une optimisation des processus de contrôle en temps réel. Nous reviendrons sur ce point à la section discussion.

4.2.5 Expérience 1 vs expérience 2

Nous avons comparé les résultats des expériences 1 et 2 afin de déterminer si les sujets peuvent maintenir le même niveau de précision spatiale lorsqu'ils doivent compenser simultanément pour la longueur et la déviation latérale d'un objet tenu dans la main et diriger l'extrémité de cet objet vers l'extrémité d'une cible 3D. Pour ce faire, nous nous sommes intéressés, en particulier, à la condition moyen pointeur de l'expérience 1 (longueur=17.5 cm) et à la condition grande déviation latérale de l'expérience 2 (longueur = 17.5, déviation latérale = 17.5 cm). Noter que ces deux pointeurs présentent une longueur identique, mais le premier est rectiligne alors que le second est en forme de 'L'. Afin d'évaluer, de façon spécifique, l'effet de la dimension des pointeurs sur la précision spatiale des sujets, nous avons également comparé la performance des sujets dans les conditions contrôles sans pointeur des expériences 1 et 2.

L'augmentation des valeurs moyennes d'erreurs 3D de la condition contrôle sans pointeur à la condition d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main est très similaire entre les expériences 1 et 2 (Figure 12A en annexe). Ce résultat est remarquable étant donné que l'utilisation du pointeur en forme de 'L' de l'expérience 2 produit un biais spatial deux fois plus grand que l'utilisation du pointeur rectiligne de l'expérience 1. Les erreurs spatiales constantes commises le long des axes horizontal (direction), sagittal (distance radiale) et vertical (élévation) sont présentées aux figures 12B, 12C et 12D respectivement. Comme c'est le cas pour les erreurs 3D absolues, les valeurs moyennes d'erreurs directionnelles sont similaires entre les deux expérimentations aussi bien pour les conditions contrôles sans pointeur que pour les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main. Les

erreurs constantes de distance radiale sont aussi relativement comparables entre les deux expériences pour les deux conditions expérimentales. Il est toutefois intéressant de noter que la moyenne des erreurs radiales de l'expérience 1 est supérieure à celle de l'expérience 2 dans la condition d'atteintes manuelles avec pointeur. Ce résultat démontre que la déviation latérale du pointeur utilisé dans l'expérience 2 n'interfère pas avec la capacité de produire des ajustements qui compensent pour la longueur du pointeur. Par ailleurs, bien que la taille des erreurs d'élévation soit pratiquement identique dans les deux expériences, l'utilisation du pointeur en forme de 'L' dans l'expérience 2 a modifié les erreurs constantes d'élévation. Dans la condition d'atteintes manuelles avec pointeur de l'expérience 2, les sujets ont placé l'extrémité du pointeur légèrement au-dessus de la cible, alors que dans la condition contrôle sans pointeur, les sujets pointaient en dessous de la cible. Les analyses statistiques supportent ces tendances moyennes. Seul l'ANOVA effectuée sur les erreurs constantes d'élévation a révélé un effet principal de condition ($F(1,8)=6,235$; $p<0,05$). Rappelons toutefois, que ce résultat s'explique par une différence de biais spatial et non par une augmentation de la taille des erreurs d'élévation dans la condition d'atteintes manuelles avec pointeur.

En somme, la similarité remarquable dans la précision spatiale des sujets dans les conditions d'atteintes manuelles avec pointeurs des expériences 1 et 2 supporte l'idée que les sujets ont intégré relativement bien les caractéristiques physiques des pointeurs en forme de 'L'. Il semble donc que les sujets soient capables de produire des ajustements fins qui compensent simultanément les biais spatiaux produits par la longueur et la forme d'un objet tenu dans la main.

CHAPITRE 5: DISCUSSION ET CONCLUSION

L'une des questions majeures en neurosciences du mouvement est de comprendre les contributions des signaux sensoriels et moteurs dans la perception et le contrôle des mouvements. Le contrôle d'actions qui impliquent la manipulation d'un objet tenu dans la main requiert la perception continue de la longueur et de la forme de l'objet. Cette étude est la première, à notre connaissance, à évaluer la précision avec laquelle les sensations haptiques permettent d'estimer les dimensions spatiales d'un objet afin de diriger l'extrémité de ce dernier à la position d'une cible tridimensionnelle.

5.1 Expérience 1

L'objectif de l'expérience 1 était d'évaluer la précision avec laquelle de jeunes adultes en santé peuvent adapter des mouvements d'atteinte manuelle à la longueur d'un objet tenu dans la main (pointeurs: de 12,5 cm, 17,5 cm et 22.5 cm) uniquement sur la base des informations haptiques. Il y a quatre résultats principaux dans cette étude. Premièrement, les erreurs 3D absolues commises par les sujets étaient significativement plus grandes dans les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main. Cependant, il n'y avait pas de différence significative entre les erreurs 3D absolues commises dans les trois conditions de pointeur et ce malgré une différence de 10 cm entre le pointeur le plus court et le plus long. Deuxièmement, les sujets ont maintenu le même niveau d'erreurs variables 3D lors des atteintes manuelles effectuées sans pointeur, avec le petit pointeur et avec le moyen pointeur. Seule la condition long pointeur était associée à des erreurs variables 3D significativement supérieures à celles commises dans la condition sans

pointeur. Troisièmement, l'augmentation des erreurs 3D absolues et variables dans les conditions de pointeurs était principalement expliquée par une augmentation significative des erreurs produites le long de l'axe sagittal (distance radiale). Quatrièmement, les déplacements 3D du poignet dans les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main étaient significativement plus courts que ceux de la condition contrôle sans pointeur. Cette adaptation du déplacement du poignet à la longueur des pointeurs a pris place le long des axes sagittal et vertical.

5.1.1 Perception de la longueur des pointeurs et ajustement du mouvement

Dans cette étude, la précision spatiale 3D des sujets dans la condition sans pointeur est légèrement inférieure à celle observée dans certaines études antérieures qui ont utilisé ce paradigme de cibles proprioceptives (Adamovich et al. 1998; Mongeon et al. 2009). Cette légère diminution de la précision spatiale est due au fait que dans notre protocole, les cibles proprioceptives étaient présentées par l'intermédiaire d'un mouvement de référence effectué avec le bras gauche alors que l'atteinte manuelle était effectuée avec le bras droit. Certaines études ont montré que cette condition, qui fait intervenir un transfert inter-hémisphérique de l'information proprioceptive concernant la position de la cible, diminue la précision spatiale des sujets (Rao et Gordon, 2001 ; Adamo et Martin, 2009). Toutefois, étant donné que nous avons utilisé le même protocole de présentation des cibles avec le bras gauche pour toutes les conditions expérimentales, les augmentations des erreurs 3D absolues observées dans les conditions d'atteintes manuelles avec pointeurs ne peuvent être expliquées par cette procédure. De façon similaire, les plus grandes erreurs 3D absolues dans les conditions d'atteintes manuelles avec pointeur ne peuvent être expliquées par une piètre mémoire spatiale, puisque la durée du délai interposé entre la présentation de

la cible et l'amorce du mouvement était maintenue constante à travers toutes les conditions expérimentales ; notamment dans la condition contrôle sans pointeur. Par conséquent, les différences d'erreurs spatiales observées entre les conditions d'atteintes manuelles avec et sans pointeur reflètent la précision avec laquelle les participants étaient capables de percevoir la longueur des différents pointeurs et d'adapter les caractéristiques cinématiques de leurs mouvements afin de placer l'extrémité des pointeurs à la position de la cible.

Les résultats de l'expérience 1 indiquent une augmentation des erreurs 3D absolues pour l'ensemble des conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main. Cette augmentation est néanmoins nettement inférieure à la longueur des pointeurs. L'erreur 3D absolue augmente de seulement 4,79 cm de la condition sans pointeur à la condition avec le plus long pointeur ($L=22,5$ cm). Ce résultat suggère que les participants ont ajusté la trajectoire spatiale de leurs mouvements afin de minimiser leurs erreurs spatiales. Cette hypothèse est confortée par l'analyse du déplacement 3D du poignet qui a révélé des déplacements significativement plus courts pour les trois conditions de pointeurs que pour la condition contrôle sans pointeur. De plus, les résultats indiquent que ces ajustements sont relativement précis. En effet, l'absence de différence significative entre les erreurs 3D absolues commises dans les trois conditions de pointeurs, combinée avec la présence d'une différence significative entre le déplacement 3D du poignet dans les conditions moyen et long pointeurs suggère qu'une différence de 5 cm entre deux pointeurs peut être perceptible et suffisamment importante pour permettre des ajustements fins aux mouvements vers les cibles. Il n'existe cependant pas de différence significative entre les conditions petit et moyen pointeurs au niveau du déplacement 3D du

poignet malgré une différence de longueur de 5 cm entre les deux pointeurs. L'absence d'une différence significative pour les ajustements produits au niveau du déplacement de la main entre les conditions petit et moyen pointeurs pourrait être due à un manque de puissance statistique associé à un petit nombre de sujets et/ou à la grande variabilité observée dans les habiletés perceptives des différents sujets testés. Nous reviendrons sur ce point plus loin dans cette section discussion.

Une hypothèse alternative pour expliquer cette observation est que la précision avec laquelle nous pouvons percevoir la longueur d'un objet et produisons des ajustements fins qui permettent de diriger l'extrémité de ce dernier à la position d'une cible dépend de l'importance du moment d'inertie du pointeur. Les travaux pionniers de Solomon et Turvey (1988) ont montré que la perception de la longueur d'un objet tenu dans la main est linéairement couplée au moment d'inertie de ce dernier. Plus grand est le moment d'inertie, plus longue est la longueur perçue des pointeurs (Solomon et Turvey, 1988 ; Turvey et al., 1992). Un éventail d'études ont par la suite rapporté des données consistantes avec l'hypothèse que le cerveau exploite la mécanique rotationnelle des objets (Pagano et al., 1994 et 1996 ; Carello et al., 2006 ; Stroop et Turvey, 2000). Selon ces dernières, le moment d'inertie serait la quantité mécanique utilisée par le système nerveux central afin d'estimer les propriétés spatiales des objets manipulés. Cependant, aucune étude n'a jusqu'au aujourd'hui évalué si la grandeur du moment d'inertie d'un objet permet de mieux estimer ses dimensions spatiales. Par exemple, il est possible que notre pouvoir discriminatif, c'est-à-dire notre habileté à percevoir de façon optimale la longueur d'un pointeur tenu dans la main, soit lié à la grandeur du moment d'inertie. L'observation que les erreurs 3D absolues étaient similaires entre les trois conditions de pointeurs, malgré

le fait que le pointeur le plus long produise un biais spatial de 10 cm plus grand que le plus petit pointeur est consistante avec cette idée. Cette hypothèse intéressante devra cependant être testée avec une plus grande étendue de longueur de pointeurs dans une étude future.

Dans les études antérieures, les différents pointeurs présentaient un écart de longueur de 15 cm (Chang et al., 2008 ; Turvey, 1996). Dans ce contexte, les auteurs rapportaient qu'il existait une relation linéaire entre la longueur perçue et la longueur réelle des pointeurs. Dans notre étude, l'observation d'ajustements significativement différents du déplacement du poignet en fonction de la longueur du pointeur dans les conditions moyen et long pointeurs suggère qu'une différence de longueur aussi petite que 5 cm peut être perçue par les jeunes adultes en santé. Dans les études futures, les limites de la capacité du système haptique à percevoir la longueur d'un pointeur tenu dans la main devront être évaluées en utilisant un plus grand nombre de pointeurs qui présentent des écarts de longueur plus petits que 5cm.

Dans la littérature portant sur l'estimation de la longueur des pointeurs, une seule étude récente a rapporté la précision avec laquelle les participants pouvaient estimer la longueur des pointeurs (Chang et al. 2008). Ces derniers ont montré que la précision de l'estimation était influencée par l'expérience des sujets dans la manipulation d'objet. Ils ont comparé la précision de participants pratiquant des sports de raquette à celle de sujets qui ont très peu ou même aucune expérience dans ces sports. Dans leur étude, les plus petits pointeurs étaient de 35 cm. Les participants expérimentés montraient des erreurs d'estimation de 1 cm et moins. Ce niveau de précision est supérieur à ce que nous observons dans notre étude.

Cependant, cette différence peut être expliquée par plusieurs facteurs. Premièrement, notre paradigme expérimental est beaucoup plus complexe que celui utilisé dans l'étude de Chang et ses collègues (2008). Dans notre étude, les sujets doivent d'une part estimer la longueur des pointeurs et d'autre part planifier un mouvement vers une cible proprioceptive tridimensionnelle. Deuxièmement, les modalités des mouvements oscillatoires utilisées par ces derniers auteurs sont différentes de celles que nous avons utilisées. Dans leur étude, des mouvements oscillatoires avaient lieu avant tous les essais et pour un temps illimité. Les sujets pouvaient donc prendre le temps qu'ils désiraient pour explorer les caractéristiques inertielles des pointeurs et estimer leurs longueurs. Comme les mouvements oscillatoires sont critiques pour percevoir le moment d'inertie des pointeurs (Solomon & Turvey, 1988 ; Solomon et al., 1989a et 1989b ; Burton et al., 1990), et que dans notre étude nous avons limité ces mouvements oscillatoires afin de rendre la tâche la plus naturelle possible, il est donc vraisemblable que ce facteur (période d'oscillation) ait permis une précision significativement plus grande dans l'étude de Chang et al. (2008). Il est également possible que la très grande précision des sujets expérimentés soit liée à la longueur des pointeurs utilisés. Est-ce que notre expérience extensive avec différents objets, par exemple une raquette de tennis, nous rend plus aptes à discriminer la longueur d'objet qui se rapproche des objets que nous utilisons fréquemment? En d'autres termes, est-ce que notre expérience rend notre pouvoir discriminatif plus spécifique?

Il semble que le paradigme expérimental, la durée de la période d'exploration des propriétés inertielles de l'objet et la taille du moment d'inertie des objets soient des facteurs déterminants dans la perception haptique de la longueur des pointeurs. Comme dans notre étude nous n'avons pas évalué le rôle de l'expérience des sujets,

il est vraisemblable que des différences au niveau du degré d'expérience dans la manipulation d'objets ou dans la pratique de sports de raquette entre les jeunes adultes testés expliquent, du moins en partie, la variabilité retrouvée dans les performances des différents sujets.

Dans une étude présentement en cours dans notre laboratoire de recherche, le rôle de l'expérience dans l'acuité du système haptique est évalué en testant la performance de sujets aveugles de naissance. Puisque chez les personnes aveugles le système haptique est majoritairement responsable de l'efficacité des interactions quotidiennes avec l'environnement, nous pourrions évaluer la plasticité du système haptique chez des personnes n'ayant aucune expérience visuelle et chez qui la manipulation d'objets est exclusivement basée sur les sensations haptiques.

5.2 Expérience 2

L'objectif de la seconde expérience était de déterminer si les informations haptiques permettent une estimation précise de la forme des objets manipulés. Deux pointeurs en forme de 'L' ont été utilisés. De façon similaire à l'expérience 1, les résultats démontrent que les sujets ont modifié la trajectoire spatiale de leur main afin d'adapter leurs mouvements aux dimensions de l'objet tenu dans la main et ainsi minimiser leurs erreurs spatiales.

De façon analogue aux résultats de l'expérience 1, les erreurs 3D absolues et variables commises par les sujets sont significativement plus grandes pour les conditions avec pointeurs que pour la condition sans pointeur. Il n'existe toutefois

pas de différences significatives entre les erreurs 3D absolues et variables commises dans les conditions d'atteintes manuelles avec pointeurs. L'augmentation des erreurs 3D absolues dans les conditions avec pointeurs est principalement expliquée par une augmentation des erreurs de distance radiale et d'élévation. Fait intéressant, il n'y a pas d'augmentation significative des erreurs de direction. Les analyses du déplacement du poignet nous indiquent que les participants ont effectué des ajustements significatifs le long des axes sagittal (distance), horizontal (direction) et vertical (élévation) entre la condition sans pointeur et les conditions avec un pointeur tenu dans la main. Les différences au niveau des valeurs moyennes entre les deux conditions de pointeurs nous indiquent que des ajustements ont pris place afin d'adapter les mouvements à la longueur de la déviation latérale des pointeurs. Cependant, lorsque des ANOVA séparées étaient effectuées sur les déplacements du poignet le long des axes sagittal, horizontal et vertical, il n'y avait pas de différence significative entre les conditions de pointeurs.

5.2.1 Perception de la longueur et de la forme des pointeurs et ajustement du mouvement

Les erreurs spatiales 3D absolues de l'expérience 2 sont petites compte tenu de la longueur du manche (17,5 cm) et de la déviation latérale des pointeurs (12,5 cm et 17,5 cm). Ce résultat combiné aux différences observées dans les déplacements du poignet entre la condition sans pointeur et les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main indiquent que les participants ont été capables de produire des ajustements leur permettant de minimiser leurs erreurs spatiales. De façon intéressante, la taille des erreurs 3D absolues moyennes obtenues dans l'expérience 1 pour la condition de pointeur ayant une longueur de 17,5 cm n'est pas

statistiquement différente de la taille des erreurs 3D absolues moyennes obtenues dans la condition de pointeur ayant une longueur et une déviation latérale de 17,5 cm de l'expérience 2. Le pointeur utilisé dans l'expérience 2 produit un biais spatial deux fois plus grand que celui dans l'expérience 1. Si l'habileté à estimer simultanément la longueur et la déviation latérale d'un objet (forme) présentait une plus grande demande pour les sujets, les erreurs commises dans l'expérience 2 devraient être significativement plus grandes. Or, les sujets ont montré des erreurs absolues de distance radiale, de direction et d'élévation similaires entre ces deux conditions. Ce résultat indique que la déviation latérale des pointeurs n'interfère pas avec l'habileté de percevoir la longueur des pointeurs. À l'inverse, l'erreur moyenne de distance radiale était plus petite dans l'expérience 2 que dans l'expérience 1. Le plus grand moment d'inertie produit par la déviation latérale du pointeur 17,5 cm x 17,5 cm pourrait expliquer ce résultat. Des études ultérieures dans lesquelles la déviation latérale de pointeurs est systématiquement variée alors que la longueur de ces pointeurs est maintenue constante permettront d'évaluer si l'augmentation de la taille du moment d'inertie associée à la déviation latérale influence la précision avec laquelle nous pouvons percevoir la longueur des pointeurs.

Il semble donc que le système haptique est capable d'estimer, de façon relativement précise, la forme d'un objet tenu dans la main. Étant donné que le moment d'inertie d'un objet varie en fonction de sa longueur et de sa forme, nos données sont consistantes avec l'hypothèse que les sujets ont été capables d'intégrer les informations sensorimotrices associées aux moments d'inertie des pointeurs utilisés afin d'adapter leurs mouvements.

Dans l'expérience 1, nous avons noté qu'une différence de 5 cm entre le pointeur moyen et le plus long pointeur a mené à un déplacement significativement différent du poignet et une erreur 3D similaire. Dans l'expérience 2, il n'y avait pas de différence significative entre les erreurs 3D absolues commises dans les deux conditions de pointeurs. Cependant, les différences de déplacement du poignet le long des axes sagittal, horizontal et vertical n'ont pas atteint des niveaux significatifs. Encore une fois, il est possible que l'absence d'une différence significative entre ces deux conditions soit attribuable à une puissance statistique trop faible due à un nombre insuffisant de sujets testés.

Une hypothèse alternative est que le pouvoir discriminatif de notre système haptique n'est pas suffisant pour distinguer une différence de déviation latérale de 5 cm. Il est possible qu'une différence de 5 cm entre la déviation latérale de deux pointeurs est plus difficile à détecter lorsque les participants doivent simultanément évaluer la longueur et la déviation latérale d'un objet (forme). Des études futures devront évaluer quelle est la plus petite différence de longueur et de déviation latérale perceptible entre deux pointeurs.

Au niveau de la seconde expérience, nous avons aussi noté une différence significative dans la direction des erreurs d'élévation. La taille des erreurs d'élévation n'a toutefois pas augmenté à travers les conditions. En effet, les sujets ont sous-estimé la hauteur des cibles dans la condition sans pointeur alors qu'ils ont surestimé leurs hauteurs pour les deux conditions avec pointeurs. Une explication plausible est que les sujets ont effectué une légère rotation du bras et de l'avant-bras durant les mouvements d'atteintes manuelles. Cette rotation aurait pour effet d'élever la

position finale de l'extrémité du pointeur et ainsi réduire le biais en élévation. Il est cependant improbable que ce facteur mécanique explique entièrement la compensation observée pour la longueur et la déviation latérale des pointeurs. Si c'était le cas, les erreurs constantes d'élévation (biais) auraient dû être systématiquement plus grandes dans la condition de grande déviation latérale en comparaison à la condition de petite déviation latérale. Or, les erreurs d'élévation constantes étaient très similaires entre les deux conditions. Il est également possible que les sujets aient légèrement incliné leur poignet vers le haut dans les conditions d'atteintes manuelles avec pointeurs. Cependant, encore une fois, si cette stratégie était utilisée de façon importante par les sujets, les erreurs constantes d'élévation devraient être supérieures dans la condition d'atteinte manuelle avec le pointeur ayant une plus grande déviation latérale.

5.3 Contrôle en temps réel

Au cours des dernières années, plusieurs études en neurosciences comportementales ont tenté d'expliquer comment les mouvements dirigés vers un but sont planifiés, exécutés et corrigés. Plusieurs chercheurs ont rapporté des résultats consistants avec l'hypothèse que les mouvements d'atteintes manuelles sont gouvernés, en partie, par des mécanismes de contrôle en temps réels (Desmurget et al., 1999 ; Saunders et Knill, 2003, 2004 et 2005 ; Soechting et Lacquaniti, 1983 ; Brenner et Smeets, 2003 ; Proteau et al., 2009 ; Pélisson et al., 1986 ; van Sonderen et al., 1989). Ces études ont démontré qu'il est possible de corriger, en temps réel, des erreurs inhérentes aux processus de perception et de planification motrice ou encore des erreurs qui proviennent de changements subits dans les conditions de l'environnement. De plus, certaines études récentes ont confirmé que ces mécanismes de corrections en temps

réel peuvent prendre place sur la base unique des signaux non visuels (proprioceptifs et copie efférente) (Gosselin-Kessiby et al., 2008 et 2009).

Dans cette étude, nous avons effectué des analyses corrélationnelles afin d'évaluer si la précision spatiale finale des mouvements d'atteinte avec un objet tenu dans la main dépend prioritairement de processus de perception et de planification motrice qui précèdent l'amorce du mouvement ou de processus qui corrigent, en temps réel, les erreurs initiales de perception et de mouvement.

Les différents résultats que nous avons obtenus semblent indiquer que les mouvements effectués avec un objet à la main font appel sensiblement aux mêmes stratégies de contrôle que les atteintes manuelles effectuées sans objet à la main. Nous avons proposé l'hypothèse que l'atteinte manuelle effectuée avec des objets à la main ferait intervenir de façon plus importante des mécanismes de contrôle en temps réel. Nos résultats ne permettent cependant pas de supporter cette hypothèse. En fait, les coefficients de détermination relativement modestes (fig. 7 et fig. 11 en annexe) observés dans cette étude suggèrent que des corrections en temps réel ont pris place dans toutes les conditions d'atteintes manuelles indépendamment de l'utilisation ou non d'un pointeur. Une seule différence s'est avérée significative : les coefficients de détermination calculés entre les erreurs de distance radiale commises au sommet de vitesse et à la fin des mouvements étaient significativement plus petits dans la condition sans pointeur. Contrairement à notre hypothèse, ce résultat suggère que l'utilisation de correction en temps réel pour compenser les biais spatiaux en distance serait moins importante dans les conditions d'atteintes manuelles avec un pointeur tenu dans la main. Il est donc possible que les adaptations de la cinématique

du mouvement afin de compenser la longueur et la forme des pointeurs dépendent de façon plus importante des processus de perception et de planification motrice qui prennent place avant l'amorce du mouvement.

Il est cependant possible que la grande similarité observée entre les coefficients de détermination obtenus entre les conditions avec et sans pointeur dans les expériences 1 et 2 soit causée par l'approche analytique utilisée. Dans cette étude, nous avons effectué des analyses corrélationnelles entre les valeurs au sommet de vitesse et les valeurs à la position finale du mouvement. Or, il est possible que des modifications aux mouvements aient eu lieu entre le sommet d'accélération et le sommet de vitesse. Certaines études récentes ont montré que des modifications de la performance motrice peuvent prendre place très tôt dans le mouvement (van Sonderen et al., 1989 ; Day and Lyon, 2000). Dans de telles circonstances, notre analyse ne serait bien évidemment pas sensible à ces modifications.

5.3 Expérience 3

Dans ce projet de maîtrise, nous avons conduit une troisième expérience de nature exploratoire (n=10 sujets). L'objectif de cette troisième étude était d'évaluer si la vision d'un mouvement de bras avec un objet tenu dans la main permettait de former une représentation interne plus précise des propriétés du segment bras-objet. Pour ce faire, nous avons permis aux sujets de visualiser un mouvement de bras avec un objet tenu dans la main à tous les huit essais. Notre raisonnement était le suivant : si la vision du bras et de l'objet permet de former une représentation interne plus précise de la longueur et de la forme de l'objet, la précision spatiale des essais subséquents sera augmentée. En variant la disponibilité des informations visuelles, nous désirions

également évaluer la persistance de cette représentation visuelle au cours des essais successifs.

Une étude antérieure a montré que la vision du bras et de la main en déplacement lors de certains essais permet d'améliorer transitoirement la précision finale d'atteintes manuelles successives effectuées sans vision chez une personne présentant une déafférentation proprioceptive (Ghez et al. 1995). Les auteurs ont suggéré que cet effet bénéfique serait dû à une amélioration transitoire de la représentation interne des propriétés mécaniques du bras.

Aucune étude n'a évalué, chez des sujets en santé, si la vision du bras et d'un objet tenu dans la main au cours d'un mouvement d'atteinte permet de former une représentation interne plus précise des propriétés physiques de l'objet manipulé afin d'améliorer la précision spatiale des mouvements successifs effectués sans vision.

Les différentes analyses effectuées n'ont pas permis de démontrer d'effet significatif de la vision alternée sur la précision spatiale des mouvements effectués avec et sans pointeur. Les sujets ont montré des erreurs spatiales (erreurs 3D absolues et variables, erreurs constantes, absolues et variables de direction, de distance radiale et d'élévation) très similaires à celles observées dans l'expérience 2 alors qu'aucune information visuelle n'était disponible.

Même si ce résultat nous apparaît fort intéressant, nous avons décidé de ne pas inclure la présentation de ces données dans ce mémoire de maîtrise. Des études subséquentes variant la fréquence et la nature des informations visuelles présentées

aux sujets permettront d'examiner plus en détail le rôle des informations visuelles dans la précision d'atteintes manuelles effectuées avec un objet tenu dans la main.

5.4 Conclusion

Les résultats obtenus dans l'expérience 1 confirment et étendent les observations des études antérieures. Ils démontrent qu'il est possible de percevoir la longueur d'un objet sans l'aide de la vision afin d'amener l'extrémité de ce dernier à la position d'une cible tridimensionnelle. Les observations de l'expérience 2 sont novatrices. Elles indiquent que les sujets sont précis lorsqu'ils manipulent des objets en forme de « L » qu'ils n'ont jamais eu la chance de voir auparavant. Ce résultat démontre, pour la première fois, qu'il est possible d'estimer simultanément la longueur et la forme d'un objet sur la base exclusive des sensations haptiques.

Les données disponibles dans la littérature indiquent que le moment d'inertie est un facteur déterminant dans la perception des caractéristiques spatiales d'un objet, notamment dans l'estimation de la longueur d'un pointeur. Dans cette recherche, nous avons manipulé le moment d'inertie des objets en variant la longueur et la forme des pointeurs. Une limite importante de cette étude est que nous n'avons pas calculé le moment d'inertie des différents objets utilisés. Cette analyse permettrait d'estimer les relations entre le pouvoir discriminatif des sujets, le moment d'inertie et les caractéristiques spatiales des objets. Par exemple, est-ce que la capacité d'estimer la longueur d'un objet varie en fonction de la taille du moment d'inertie? Est-ce que deux objets présentant un moment d'inertie similaire mais une forme différente seront perçus avec la même précision? Des études futures incluant un plus grand nombre de sujets, une plus grande variété de pointeurs (de longueur et de forme

différentes) et dans lesquelles les moments d'inertie sont calculés permettront de mieux comprendre les mécanismes fondamentaux qui sous-tendent la perception haptique de la longueur et de la forme des objets que nous manipulons dans les conditions naturelles de la vie quotidienne.

RÉFÉRENCES

Abrams R.A., Meyer D.E., Kornblum S., Eye–hand coordination: oculomotor control in rapid aimed limb movements, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 16, 248–267, 1990

Abrams R.A., Pratt J., Rapid aimed limb movements: differential effects of practice on component submovements, *Journal of Motor Behavior* 25, 288–298, 1993

Adamo D.E., Martin B.J., Position sense asymmetry, *Experimental Brain Research*, 192(1): 87-95, 2009

Adamovich S.V., Berkinblit M.B., Fookson O., Poizner H., Pointing in 3D space to remembered targets. I. Kinesthetic versus visual target presentation, *The American Physiology Society*, 9: 2833-2846, 1998

Allard P., Blanchi J.P., Analyse du mouvement humain par la biomechanique, *Éditions Décarie Vigot 2^e édition*, 2000

Amazeen E.L., Turvey M.T., Weight perception and the haptic size-weight illusion are functions of the inertia tensor, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(1): 213-232, 1996

Arbib M.A., Perceptual structures and distributed motor control, *In V. Brook (Ed.), Handbbok of physiology: Section 1: The nervous system. Vol.2. Motor control, part 2*, p. 1449-1480, 1981

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

Brenner E., Smeets B.J., Fast corrections of movements with a computer mouse, *Spatial Vision*, 16 (3-4): 365–376, 2003

Burton G., Turvey M.T., Solomon H.Y., Can shape be perceived by dynamic touch?, *Perception and Psychophysics*, 48: 477-487, 1990

Carello C., Kinsella-Shaw J., Amazeen E.L., Turvey M.T., Peripheral neuropathy and object length perception by effortful (dynamic) touch: A case study, *Neuroscience Letters*, 405: 159-163, 2006

Carlton L.G., Processing visual feedback information for movement control, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7: 1019-1032, 1981

Carlton L.G., Carlton M.J., A note on constant error shifts in post-perturbation responses, *Journal of Motor Behavior*, 16(1): 84-96, 1984

Chan T.C., The situational effects on haptic perception of rod length, *Perception and Psychophysics*, 58(7): 1110-1123, 1996

Chan T.C., The effect of density and diameter on haptic perception of rod length, *Perception and Psychophysics*, 57(6): 778-786, 1995

Chan T.C., Haptic perception of partial-rod lengths with the rod held stationary or wielded, *Perception and Psychophysics*, 55(5): 551-561, 1994

Chan T.C., Turvey M.T., Perceiving the vertical distances of surfaces by means of a hand-held probe, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(2): 347-358, 1991

Chang C.-H., Wade M.G., Stoffregen T.A., Ho H.-Y., Length perception by dynamic touch: the effects of aging and experience, *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 63(3): 165-170, 2008

Chua R., Elliott D., Visual regulation of manual aiming, *Human Movement Science* 12, 365-401, 1993

Cooper M.M., Carello C., Turvey M.T., Perceptual independence of whole length, partial length, and hand position in wielding a rod, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(1): 74-85, 1996

Criscimagna-Hemminger S.E., Donchin O., Gazzaniga M.S., Shadmehr R., Learned dynamics of reaching movements generalize from dominant to nondominant arm, *Journal of neurophysiology*, 89(1): 168-176, 2003

Davidson P.R., Wolpert D.M., Widespread access to predictive models in the motor system: a short review, *Journal of neural engineering*, 2(3): S313-319, 2005

Day B.L., Lyon I.N., Voluntary modification of automatic arm movements evoked by motion of a visual target, *Experimental Brain Research*, 130: 159-168, 2000

Desmurget M., Pélisson D., Rossetti Y. et Prablanc C., From eye to hand: planning goal-directed movements, *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 22(6): 761-788, 1998

Desmurget M., Epstein C.M., Turner R.S., Prablanc C., Alexander G.E. et Grafton S.T., Role of the posterior parietal cortex in updating reaching movements to a visual target, *Nature neuroscience*, 2(6): 563-567, 1999

Desmurget M., Grafton S., Forward modelling allows feedback control for fast reaching movements, *Trends cognitive Sciences*, 4:423-431, 2000

Desmurget M., Grafton S., Feedback of feedforward control : end of a dichotomy, *Taking action : Cognitive neuroscience perspectives on intentional acts (Johnson-Frey S.H. ed.)*, MIT Press, 289-338, 2003

Desmurget M., Turner R.S., Prablanc C., Russo G.S., Alexander G.E., Grafton S.T., Updating target location at the end of an orienting saccade affects the characteristics of simple point-to-point movements, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(6): 1510-1536, 2005

Epstein W., Percept-percept couplings, *Perception*, 11: 75-83, 1982

Gandolfo F., Mussa-Ivaldi F.A., Bizzi E., Motor learning by field approximation, *Neurobiology*, 93: 3843-3846, 1996

Ghez C., Gordon J., Ghilardi MF., Impairments of reaching movements in patients without proprioception. II. Effects of visual information on accuracy, *Journal of neuropsychology*, 73(1): 361-72, 1995

Gibson J.J., The senses considered as perceptual systems, Boston: Houghton Mifflin, 1966

Gordon J.J., Ghez C., Trajectory control in targeted force impulses. III. Compensatory adjustments for initial errors, *experimental Brain Research*, 67(2): 23-269, 1987

Gosselin-Kessiby N., Messier J., Kalaska J.F., Evidence for automatic on-line adjustments of hand orientation during natural reaching movements to stationary targets, *Journal of Neurophysiologie*, 99:1653-1671, 2008

Gosselin-Kessiby N., Kalaska J.F., Messier J., Evidence for a proprioception-based rapid on-line error correction mechanism for hand orientation during reaching movements in blind subjects, *Journal of neuroscience*, 29(11): 3485-3496, 2009

Helmholtz von H., Treatise on Physiological optics, *JPC Optical Society of America*, vol. 3, 1925, [Travaux originaux publiés en 1866.]

Jeannerod M., The neural behavioural organization of goal-directed movements, *Oxford Clarendon press*, p.283, 1988

Kandel E.R., Schwartz J.H., Jessell T.M., Principles of neural science 4th edition, *McGraw-Hill, New-York*, 2000

Keele S.W., Posner M.I., Processing of visual feedback in rapid movements, *Journal of Experimental Psychology*, 77: 155-158, 1968

Khan M.A., Franks I.M., Elliot D., Lawrence G.P., Chua R., Bernier P.M., Hansen S., Weeks D.J., Inferring online and offline processing of visual feedback in target-directed movements from kinematic data, *Neuroscience and Behavioral Reviews*, 30: 1106-1121, 2006

Kingma I., van de Langenberg R., Beek P.J., Which mechanical invariants are associated with the perception of length and heaviness of a nonvisible handheld rod? Testing the inertia tensor hypothesis, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30(2): 346-354, 2004

Klatzky R.L., Lederman S.J., Metzger V.A., Identifying objects by touch : « expert system », *Perception and psychophysics*, 37(4) : 299-302, 1985

Kording K.P., Tenenbaum J.B., Shadmehr R., The dynamics of memory as a consequence of optimal adaptation to a changing body, *Nature neuroscience*, 10(6): 779-786, 2007

Kreifeldt J.G., Chuang M-C., Moment of inertia: Psychophysical study of an overlooked sensation, *Science*, 206: 588-590, 1979

Lafargue G., Paillard J., Lamarre Y., Sirigu A., Production and perception of grip force without proprioception: is there a sense of effort in deafferented subjects?, *The European journal of neuroscience*, 17(12): 2741-2749, 2003

Lafargue G., Sirigu A., The nature of the sense of effort and its neural substrate, *Revue neurologique*, 162(6-7): 703-712, 2006

Matthews P.B., Where does Sherrington's "muscular sense" originate? Muscles, joints, corollary discharges?, *Annual review of neuroscience*, 5: 189-218, 1982

Messier J., Kalaska J.F., Comparison of variability of initial kinematics and endpoints of reaching movements, *Experimental Brain Research*, 125(2): 139-152, 1999

Meyer D.E., Abrams R.A., Kornblum S., Wright C.E., Smith J.E.K., Optimality in human motor performance: ideal control of rapid aimed movements, *Psychological Review* 95: 340-370, 1988

Milner T.E., A model for the generation of movements requiring endpoint precision, *Neuroscience*, 49(2): 487-496, 1992

Mongeon D., Bkanchet P. et Messier J., Impact of Parkinson's disease and dopaminergic medication on proprioceptive processing, *Neuroscience*, 158(2) : 426-440, 2009

Oldfield R.C., The assessment and analysis handedness: the Edinburgh inventory, *Neuropsychologia*, 9(1): 97-113, 1971

Pagano C.C., Kinsella-Shaw J.M., Cassidy P.E., Turvey M.T., Role of the inertia tensor in haptically perceiving where an object is grasped, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(2): 276-285, 1994

Pagano C.C., Carello C., Turvey, M.T., Exteroception and exproprioception by dynamic touch are different functions of the inertia tensor, *Perception and Psychophysics*, 58(8): 1191-1202, 1996

Paillard J., 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, 1996

Pasquinelli E., Aux frontières du toucher, Voir Barré, 26-27, 74-86, 2003

Péligsson D., Goodale M.A., Jeannerod M., Visual control of reaching movements without vision of the limb. II. Evidence of fast unconscious processes correcting the trajectory of the hand to the final position of a double-step stimulus, *Experimental Brain Research*, 62: 303-311, 1986

Plamondon R., Alimi A.M., Speed/accuracy trade-offs in target-directed movements, *The Behavioral and brain sciences*, 20(2): 279-303, 1997

Prablanc C., Echallier J.F., Jeannerod M. et Komilis E., Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target. II. Static and dynamic visual cues in the control of hand movement, *Biological Cybernetics*, 35: 183-187, 1979a

Prablanc C., Echallier J.F., Komolis E. et Jeannerod M., Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target. I. Spatio-temporal characteristics of eye and hand movements and their relationships when varying the amount of visual information, *Biological Cybernetics*, 35: 113-124, 1979b

Proteau L., Roujoula A., Messier J., Evidence for continuous processing of visual information in a manual video-aiming task, *Journal of motor behavior*, 41(3): 219-231, 2009

Purves D., Augustine G.-J., Fitzpatrick D. et Hall W.-C., Neurosciences 3eme edition, *neurosciences et cognition*, 811 pages, 2005

Rao A.K., Gordon A.M., Contribution of tactile information to accuracy in pointing movements, *Experimental brain research*, 138(4): 438-445, 2001

Sainburg R.L., Ghez C., Kalakanis D., Intersegmental dynamics are controlled by sequential anticipatory, error correction, and postural mechanisms, *Journal of neurophysiology*, 81(3): 1045-1056, 1999

Saunders J.A., Knill D.C., Humans use continuous visual feedback from the hand to control fast reaching movements, *Experimental Brain Research*, 152(3): 341-352, 2003

Saunders J.A., Knill D.C., Visual feedback control of hand movements, *Journal of Neuroscience*, 24(13): 3223-3234, 2004

Saunders J.A., Knill D.C., Humans use continuous visual feedback from the hand to control both direction and distance of pointing movements, *Experimental Brain Research*, 162: 458-473, 2005

Soechting J.F., Lacquaniti F., Modification of trajectory of a pointing movement in response to a change in target location, *Journal of Neurophysiology*, 49(2): 548-564, 1983

Solomon H.Y., Turvey M.T., Haptically perceiving the distances reachable with hand-held objects, *Human Perception and Performance*, 14 (3): 404-427, 1988

Solomon H.Y., Turvey M.T., Burton G., Perceiving extents of rods by wielding : haptic diagonalization and decomposition of the inertia tensor, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(1): 58-68, 1989

Stroop M., Turvey M.T., Fitzpatrick P., Carello C., Inertia tensor and weight-percept model of length perception by static holding, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26 (3): 1133-1147, 2000

Turvey M.T., Burton G., Pagano C.C., Solomon H.Y., Runeson S., Role of the inertia tensor in perceiving object orientation by dynamic touch, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(3): 714-727, 1992

Turvey M.T., Dynamic touch, *The American psychologist*, 51(11): 1134-52, 1996

van Sonderen J.F., Gielen C.C., Denier van der Gon J.J., Motor programmes for goal-directed movements are continuously adjusted according to changes in target location, *Experimental Brain Research*, 78: 139-146, 1989

Wolpert D.M., Flanagan JR., Motor prediction, *Current biology*, 11(18): R729-732, 2001

Woodworth R.S., The accuracy of voluntary movement, *Psychological Review*, 3: 1–114, 1899

Figure 1

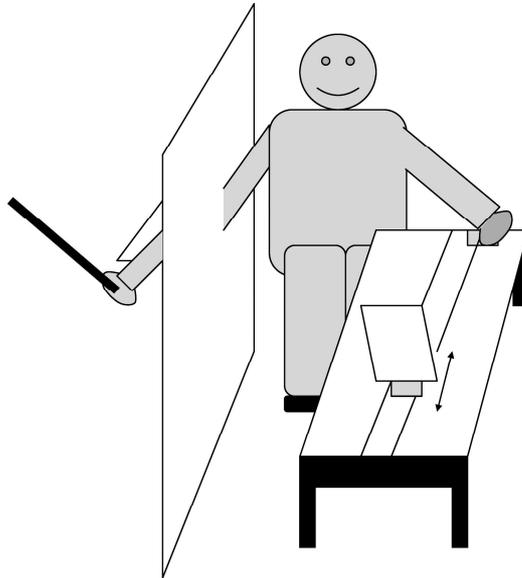


Figure 2

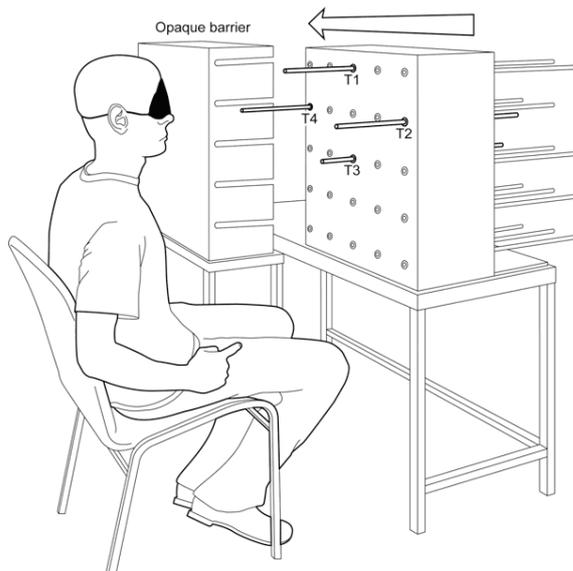


Figure 3

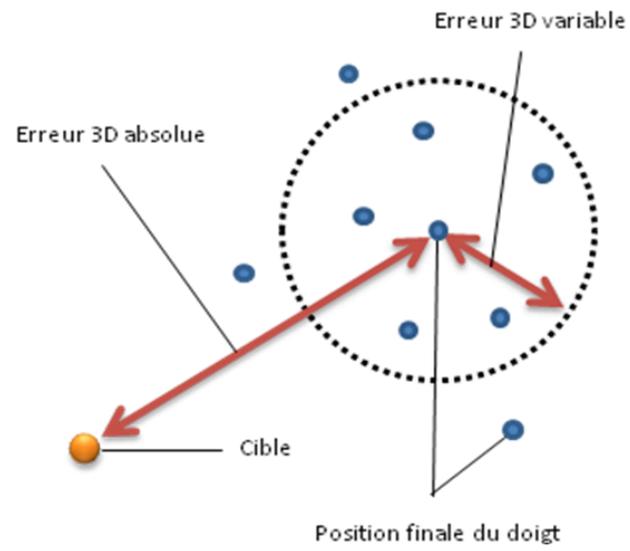


Figure 4

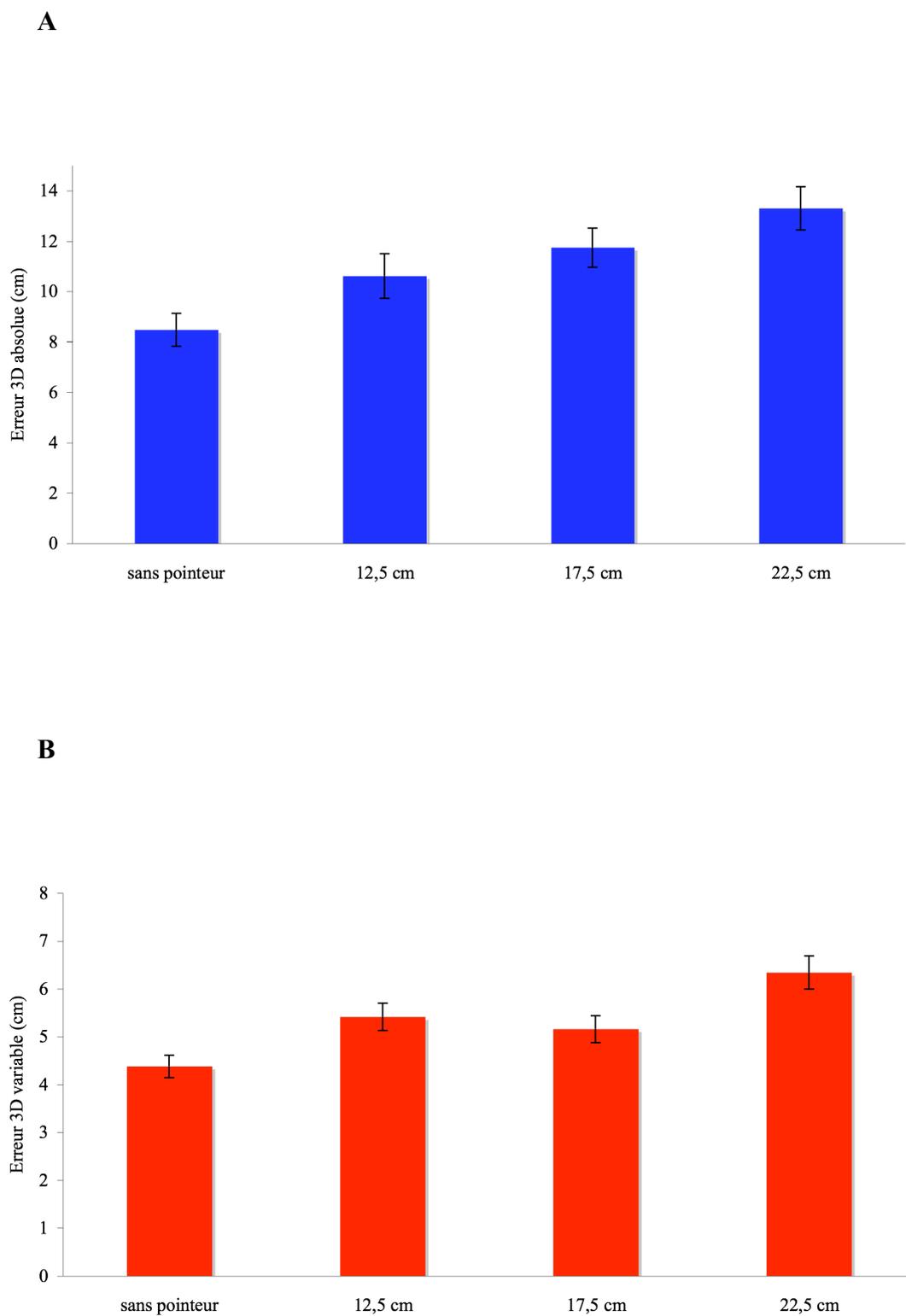
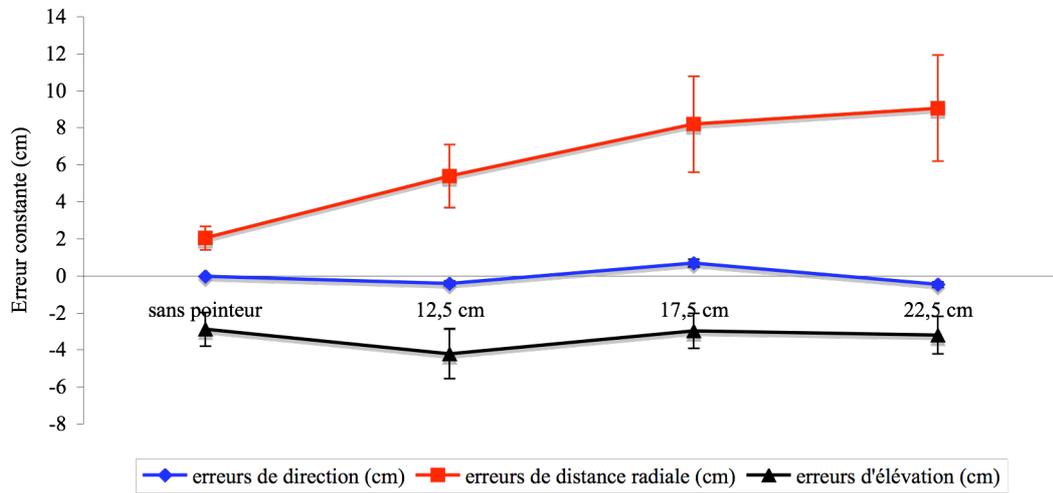


Figure 5

A



B

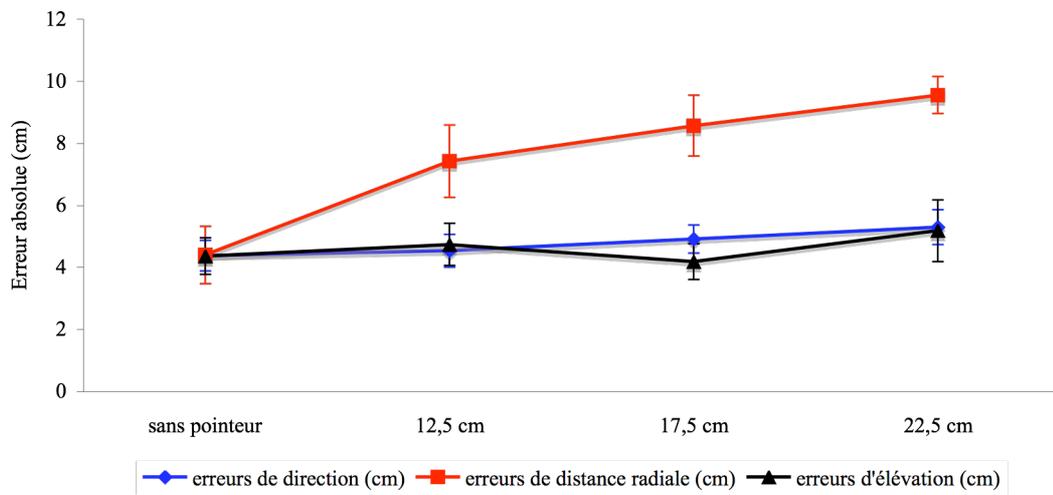


Figure 6

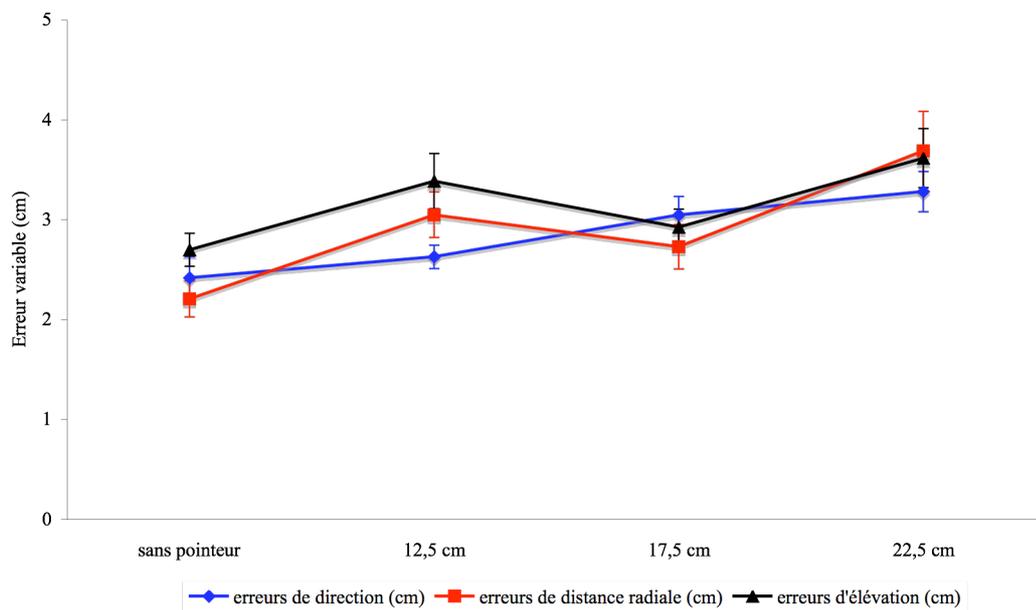


Figure 7

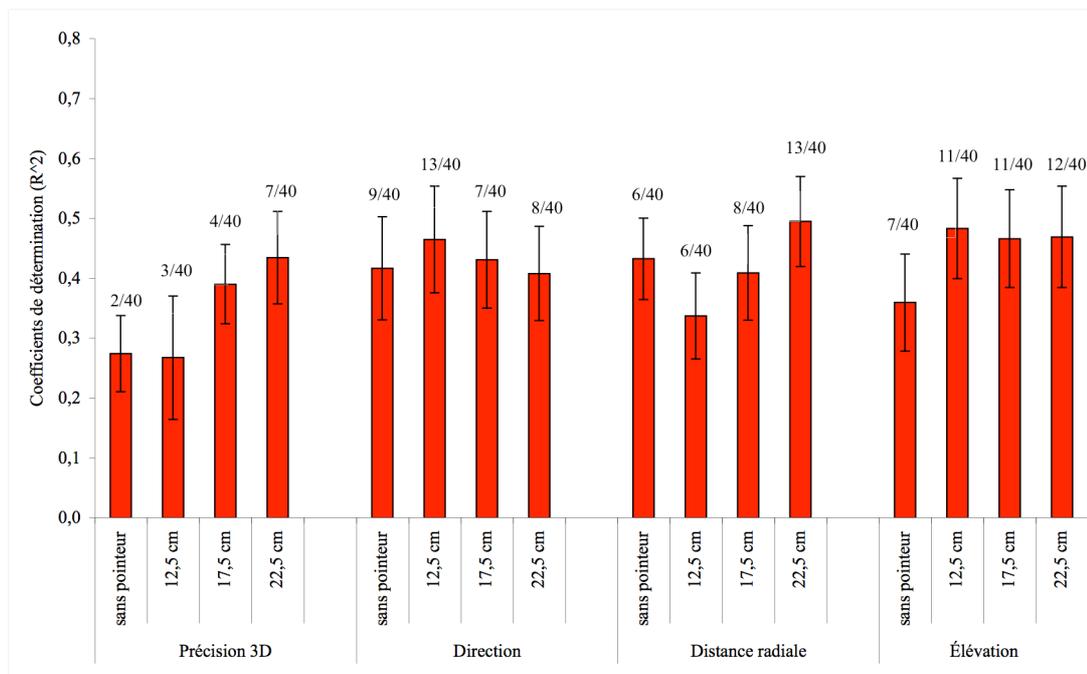


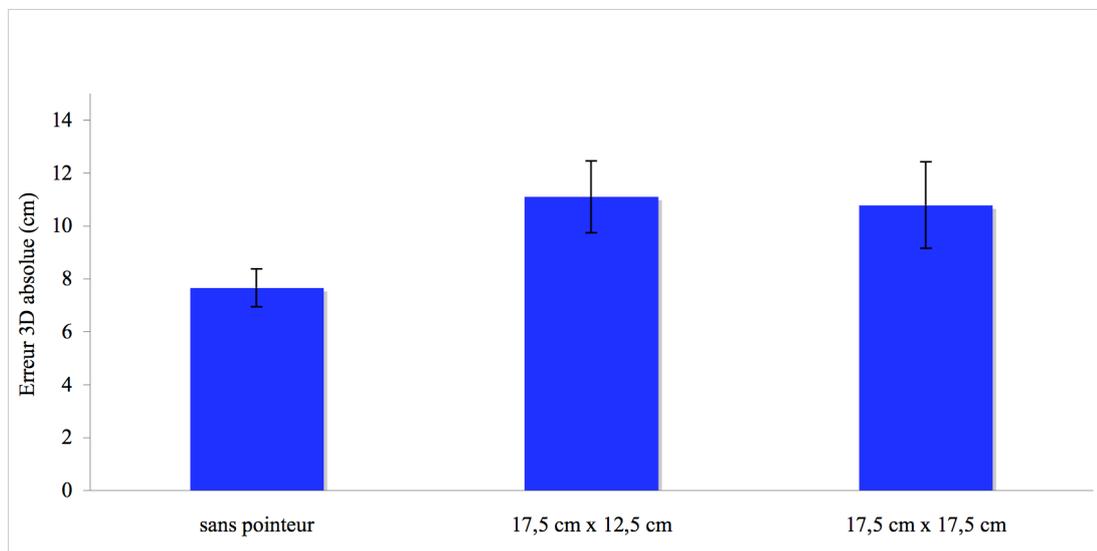
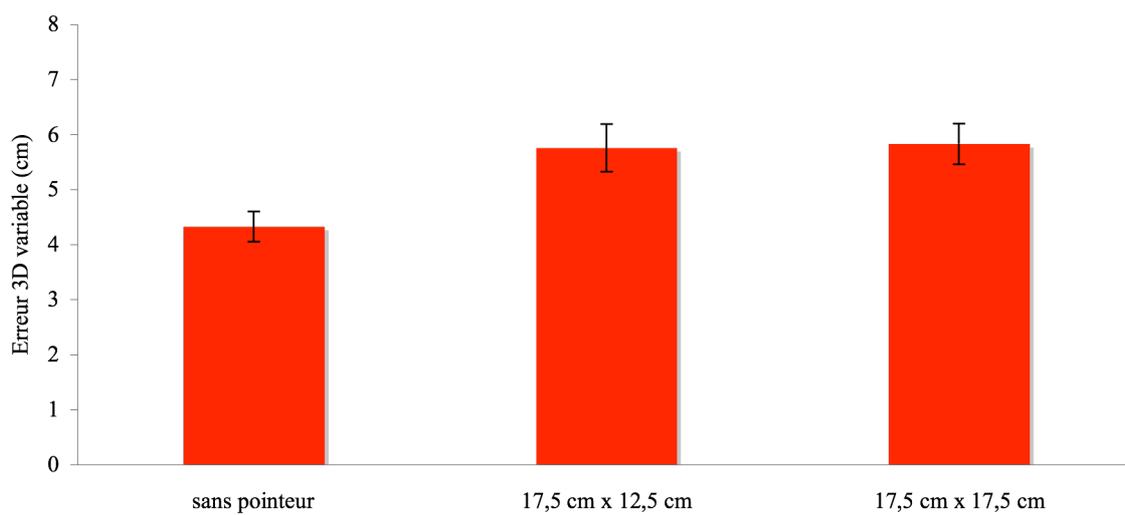
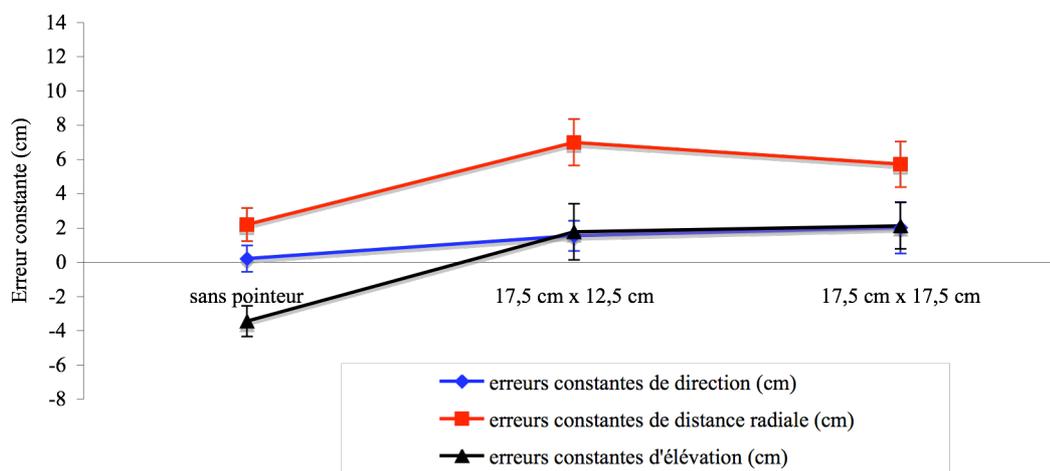
Figure 8**A****B**

Figure 9

A



B

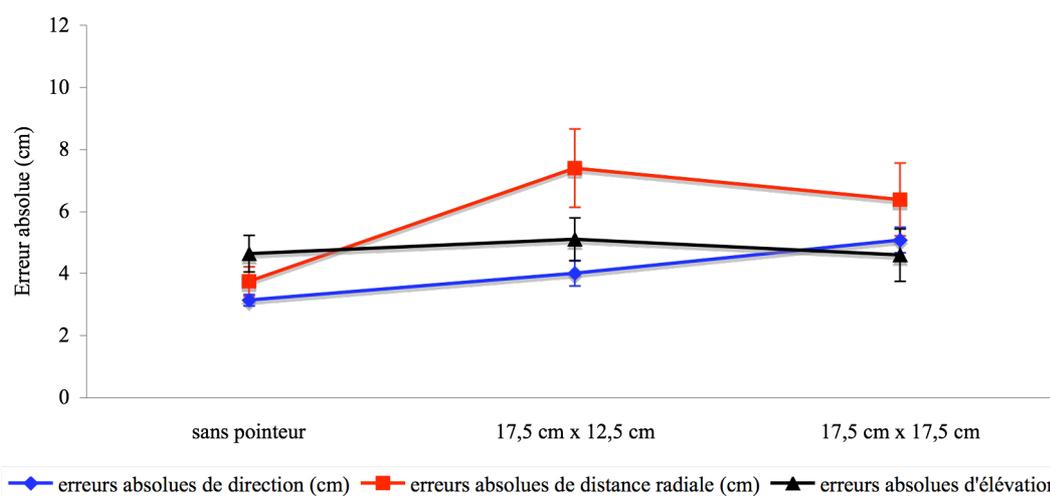


Figure 10

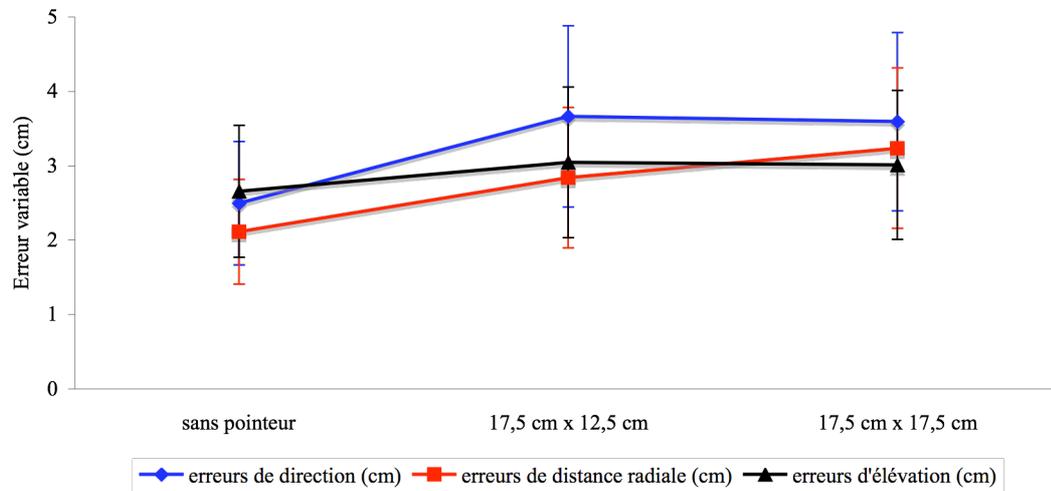


Figure 11

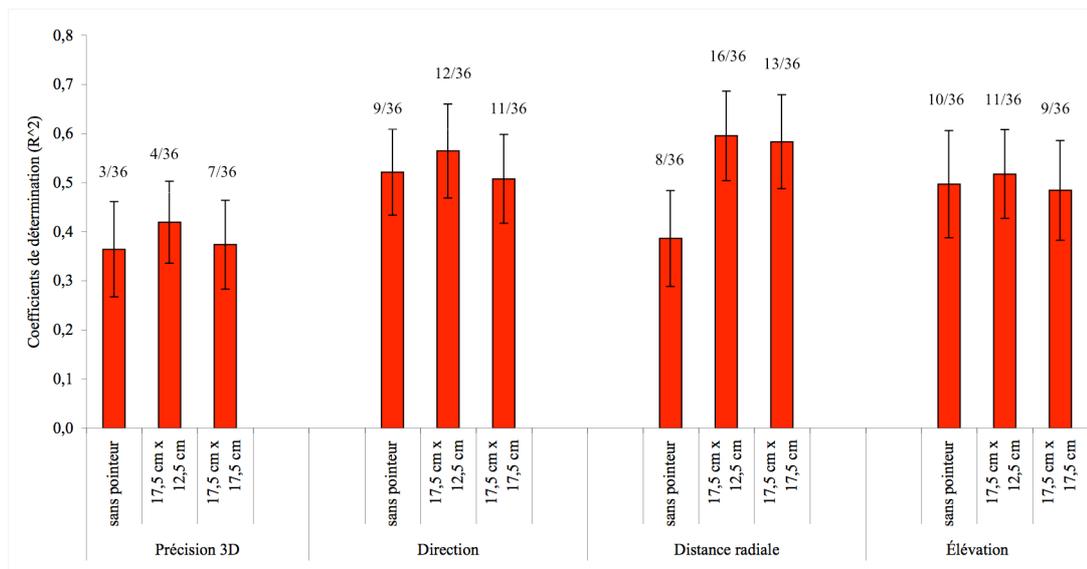
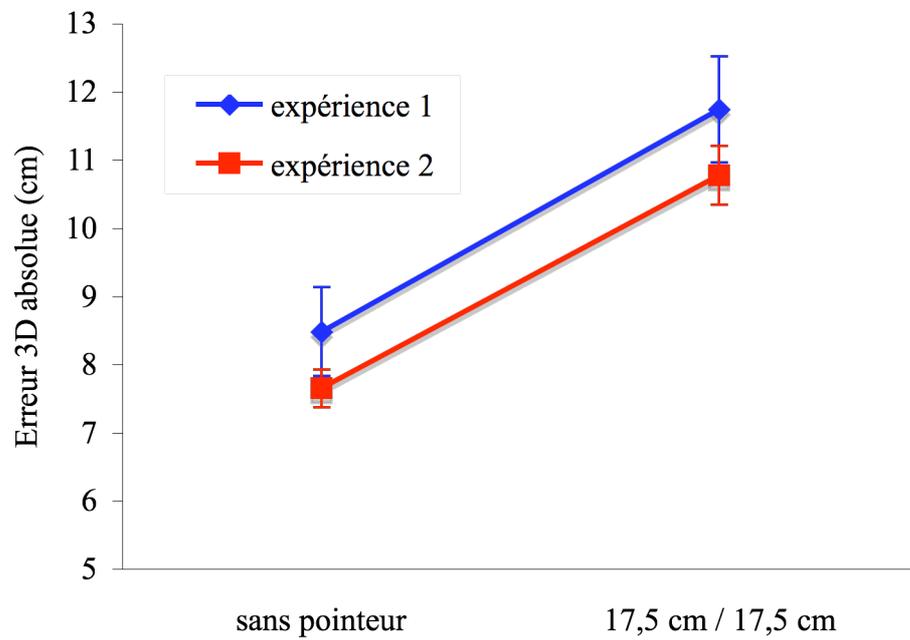
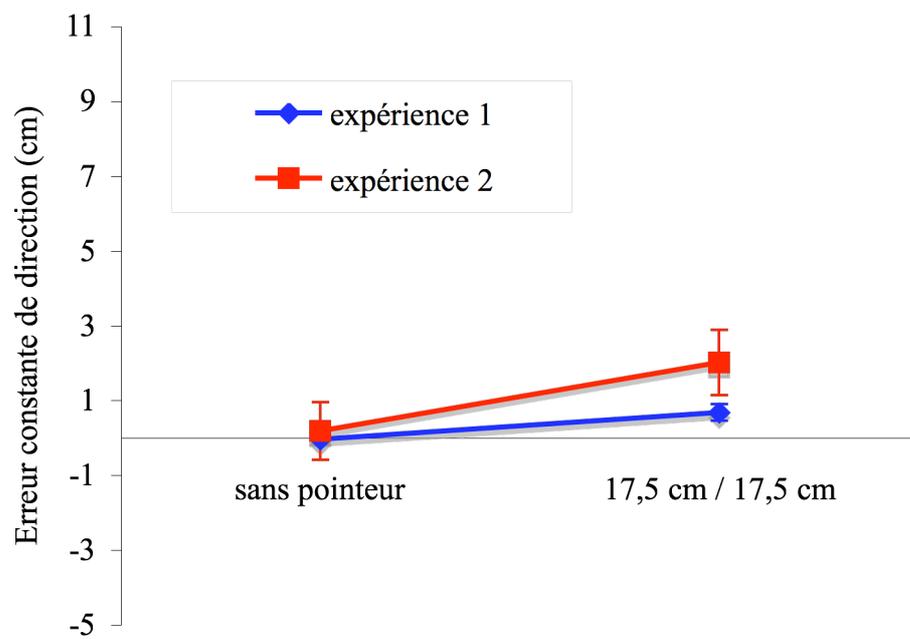


Figure 12

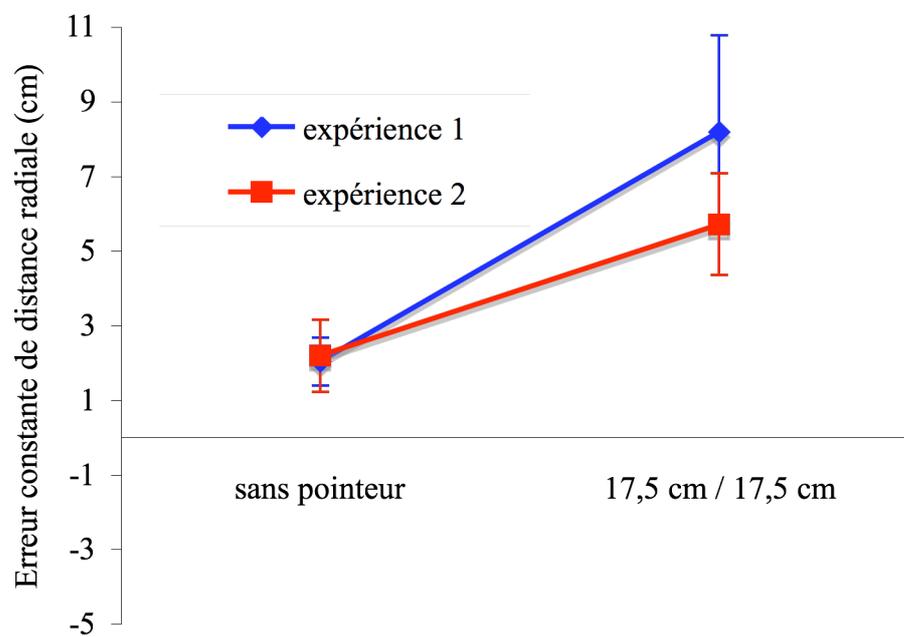
A



B



C



D

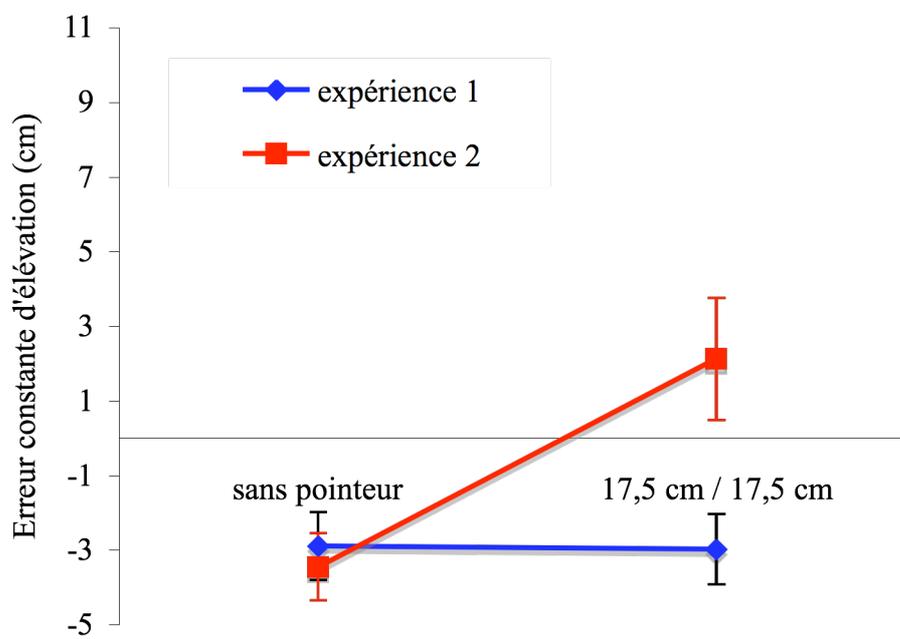


Tableau 1

Déplacement du poignet (cm) : expérience 1				
Distance radiale				
cible	sans pointeur	12,5 cm	17,5 cm	22,5 cm
1	11,03	8,21	9,05	7,56
2	10,83	7,18	6,88	4,46
3	15,25	11,12	11,68	9,51
4	7,54	5,79	6,94	4,97
moyenne	11,16	8,07	8,64	6,62
Direction				
cible	sans pointeur	12,5 cm	17,5 cm	22,5 cm
1	7,42	10,05	6,54	5,73
2	14,91	15,05	16,57	15,32
3	7,40	7,28	7,05	5,72
4	29,50	28,16	26,88	26,98
moyenne	14,81	15,13	14,26	13,44
Élévation				
cible	sans pointeur	12,5 cm	17,5 cm	22,5 cm
1	51,80	47,86	47,38	43,46
2	41,61	35,96	37,97	34,44
3	32,73	28,73	27,71	25,63
4	42,30	38,20	37,46	35,92
moyenne	42,11	37,69	37,63	34,86

Tableau 2

Déplacement du poignet (cm) : expérience 2			
Distance radiale			
cible	sans pointeur	17,5 cm x 12,5 cm	17,5 cm x 17,5 cm
1	12,31	14,70	13,52
2	10,31	13,18	11,57
3	15,11	15,44	14,02
4	11,21	12,06	10,13
moyenne	12,23	13,85	12,31
Direction			
cible	sans pointeur	17,5 cm x 12,5 cm	17,5 cm x 17,5 cm
1	4,45	8,73	10,48
2	16,21	11,20	10,64
3	7,27	9,72	11,24
4	21,20	24,73	26,71
moyenne	12,28	13,60	14,77
Élévation			
cible	sans pointeur	17,5 cm x 12,5 cm	17,5 cm x 17,5 cm
1	47,59	41,70	40,93
2	38,53	33,93	32,44
3	31,07	26,16	23,15
4	37,44	32,83	28,48
moyenne	38,66	33,66	31,25