

**Université de Montréal**

**Étude du caractère automatique du processus de  
contrôle en ligne lors de tâche de pointage manuel**

**Par :**

**Marie Veyrat-Masson**

**Département de kinésiologie**

**Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du  
grade de Maîtrise (M.Sc.) en Sciences de l'activité physique**

**Mars 2010**

**©, Marie Veyrat-Masson, 2010**

**Université de Montréal**  
**Faculté des études supérieures**

Ce mémoire intitulé :  
Étude du caractère automatique du processus de  
contrôle en ligne lors de tâche de pointage manuel

présenté par :  
Marie Veyrat-Masson

**a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :**

Dave Ellemberg  
Président-rapporteur  
Luc Proteau  
Directeur de recherche  
Julie Messier  
Membre du jury

## RÉSUMÉ ET MOTS CLEFS EN FRANÇAIS

---

### Résumé

Lors d'une tâche de pointage manuel, la présence de corrections rapides, adaptées, automatiques et même réflexes (Franklin et Wolpert, 2008) suite à une perturbation par saut de curseur a pu être observée dans de nombreuses études. Ici, nous avons souhaité déterminer si ces corrections étaient purement réflexes où si elles étaient amorcées seulement lorsque la perturbation mettait en péril l'atteinte de la cible ; ces corrections ont-elles aussi un aspect fonctionnel ? Dans une première expérience nous avons fait varier la taille des cibles (5 ou 30 mm de diamètre) et des sauts du curseur (5, 15 ou 25 mm) de manière à obtenir certaines combinaisons où la cible pourrait être atteinte sans qu'aucune correction du mouvement pour contrecarrer l'effet du saut du curseur ne soit nécessaire. Des corrections réduisant l'erreur d'environ 65% ont été observées dans toutes les conditions. Dans une seconde expérience, les participants devaient atteindre une très grande cible (arc de 30°) et un saut de curseur de 15 mm était introduit pour certains essais peu de temps après l'amorce du mouvement. Les participants ont modifié leur mouvement dans le sens opposé à celui de la perturbation, et cela même s'ils n'avaient pas détecté consciemment le saut. Cependant, ces corrections étaient moins rapides et plus petites (42% de l'amplitude du saut de curseur) que celles observées lors de la première expérience. Nos résultats supportent le fait que l'amorce des corrections pour des erreurs de trajectoire induites expérimentalement soit de nature réflexe. Un deuxième processus serait alors responsable du déroulement de ces corrections ; ce deuxième processus est basé, entre autres, sur les caractéristiques de la cible.

**Mots clefs :** Pointage manuel, feedback visuel, contrôle en ligne, pilote automatique, saut de curseur.

## RÉSUMÉ ET MOTS CLEFS EN ANGLAIS

---

### Résumé

Cursor-jump experiments have suggested the existence of quick, efficient, automatic and even reflexive (Franklin and Wolpert, 2008) online correction processes in manual aiming movements. In the present study, we wanted to determine whether corrections for a cursor jump are purely automatic/reflexive or whether they are functional in that they occur only when they are required for the target to be reached. In a first experiment, we used different target sizes (5 mm to 30 mm) and cursor-jump amplitudes (5 mm to 25 mm) so that for some target size/cursor-jump combinations, no correction would be needed to reach the target. In all cases, we observed a correction for the cursor-jump. This correction reduced the error induced by the cursor jump by 60-70%, regardless of target size. In a second experiment, we asked participants to point at a large wedge (30° of circular arc). For some trials, a cursor-jump translated the location of the cursor laterally by 15 mm soon after movement initiation. Participants never consciously detected the cursor-jump but clearly modified the trajectory of their movement in the direction opposite to that of the cursor-jump. These corrections were smaller than those observed in the first experiment (42% of the cursor-jump). Our results indicate that the initiation of a correction for a cursor-jump is more reflexive than it is functional. A second correction process would tailor the movement's initial impulse based on the target characteristics.

**Mots clefs :** Aiming movements, visual feedback, online motor control, automatic pilot, cursor-jump.

## TABLE DES MATIÈRES

---

Résumé et mot-clefs en français.....	p. iii
Résumé et mot-clefs en anglais.....	p. v
Liste des tableaux.....	p. vii
Liste des figures.....	p. viii
Liste des sigles et abréviations.....	p. ix
Recensement des écrits .....	p. 1
Contexte du mémoire .....	p. 20
Article scientifique : Automaticity vs. functionality of online control processes in manual aiming .....	p. 21
Conclusion générale .....	p. 57
Bibliographie .....	p. 60

## LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau 1</b> : Mean frontal and sagittal constant errors, and movement time as a function of the type of trials, target size, and cursor-jump amplitude .....	p.58
<b>Tableau 2</b> : Mean latency and slope of the correction (standard deviation) for a cursor-jump as a function of target size and cursor-jump amplitude .....	p.59

## LISTE DES FIGURES

---

### Recensement des écrits

Figure 1 : Exemple d'une perturbation du feedback visuel de la main par un saut de curseur sur un écran vidéo horizontal .....	p.20
--	------

### Article scientifique

Figure 1 : Task and apparatus .....	p.61
Figure 2 : Stylus trajectories for control and cursor-jump trials aimed at 5 mm and 30 mm targets located at 7.5° and 15° to the right of the starting base .....	p.62
Figure 3 : Movement endpoint .....	p.63
Figure 4 : Movement trajectories of no-jump (control) trials for one randomly selected participant in Experiment 2 .....	p.64



## LISTE DES SIGLES ET ABBRÉVIATIONS

---

SNC système nerveux central

FBV feedback visuel

mm millimètre

° degré

ms milliseconde

## RECENSEMENT DES ÉCRITS

---

### **Introduction**

Le contrôle sensorimoteur fait référence à l'utilisation des informations sensorielles lors de l'exécution du mouvement. Les différents modèles théoriques relatifs au contrôle de l'exécution du mouvement seront tout d'abord présentés. Nous verrons qu'il a été montré que ce contrôle pouvait être réalisé au cours de l'exécution du mouvement (c'est-à-dire en ligne ou en continue). Ensuite, nous verrons les différents rôles et propriétés du traitement des informations visuelles lors du mouvement. Nous exposerons ensuite les méthodes expérimentales de mise en évidence de processus de contrôle continu, en détaillant principalement le paradigme du saut de curseur. Enfin, nous analyserons les propriétés particulières du contrôle en ligne et plus particulièrement celles concernant l'automatisme et l'adaptabilité du processus.

### **I. Les modèles pour l'exécution du mouvement**

Au cours du vingtième siècle, différents modèles ont été proposés pour expliquer comment l'être humain guidait ses réponses motrices. Selon Adams (1971), le mouvement serait contrôlé en boucle fermée. Un modeste programme moteur basé sur une trace mnésique des expériences passées serait en charge de l'amorce du geste, puis un second état de mémoire (trace perceptuelle formée à partir des conséquences sensorielles passées) serait alors responsable du guidage du membre lors de l'exécution du mouvement. En cours d'exécution, si une différence advenait entre la rétroaction sensorielle et les conséquences sensorielles attendues, le mouvement serait alors corrigé. Étant donné les délais requis pour effectuer cette boucle de rétroaction, il est peu probable

que ces processus de détection et de correction des erreurs soient responsables du guidage des mouvements rapides.

Pour certains autres auteurs (Keele, 1968 ; Keele et Posner, 1968), le geste à produire serait entièrement préparé avant son amorce et réalisé sans que les informations sensorielles ne soient utilisées en cours d'exécution, les fonctions exécutives supérieures n'ayant qu'à choisir le programme moteur approprié. Comme il a été démontré qu'il est possible de modifier un mouvement en cours de réalisation sur la base d'informations sensorielles disponibles lors de l'exécution d'un mouvement (Goodale et Milner, 1992; Soechting et Lacquaniti, 1983), cette théorie est devenue caduque.

Les modèles hybrides proposent plutôt une planification centrale du mouvement couplée à un traitement des informations sensorielles pour la correction du mouvement en cours ou pour l'analyse de la performance (Abbs, Gracco et Cole, 1984; Schmidt, 1975). La réponse motrice serait planifiée en fonction des expériences passées et des conditions initiales de la tâche, et régulée ensuite en cours d'exécution en fonction des conséquences sensorielles et du résultat attendu et obtenu. En fonction du geste à produire, un schéma moteur (Schmidt, 1975) engendrerait la spécification de la réponse (un programme moteur spécifique) ainsi que les conséquences sensorielles attendues, permettant à la fois planification et contrôle en direct du mouvement.

Les premiers modèles hybrides proposaient que l'impulsion initiale de mouvement était relativement stéréotypée et que des ajustements en temps réel prendraient surtout place vers la fin du mouvement. Toutefois, Desmurget et Grafton (2000; voir aussi Proteau et Masson, 1997) ont proposé que même l'impulsion initiale de mouvement pouvait être modulée grâce à un système de prédiction du mouvement (feedforward). Ainsi, les commandes motrices dirigées vers le système moteur seraient évaluées lors de

leur envoi pour déterminer si elles permettront d'atteindre l'objectif visé. Si tel n'est pas le cas, des commandes de correction seraient alors émises. Cette évaluation du mouvement ne nécessiterait pas le recours au traitement des afférences ce qui réduit sensiblement le temps requis pour amorcer une correction. Le système prédictif proposé ci-haut serait mis à jour lorsque les afférences relatives au déroulement du mouvement deviennent disponibles.

## **II. Traitement de l'information visuelle lors de tâches de pointage manuel**

On sait depuis longtemps que lors d'une tâche de pointage manuel, le système nerveux central est capable de traiter les informations visuelles disponibles afin d'améliorer la précision du geste demandé. En effet, retirer la présence de la vision lors d'une tâche de pointage manuel altère la précision et la variabilité du geste témoignant de l'importance de cette source d'information (Carlton, 1981; Prablanc, Pélisson et Goodale, 1986; Proteau, 2005; Proteau, Marteniuk, Girouard et Dugas 1987). Nous allons nous intéresser aux propriétés du traitement des informations visuelles et leur rôle dans le contrôle du mouvement.

### **a. Poids relatif de l'importance des informations visuelles et proprioceptives**

Lors d'un geste de précision, comme une atteinte manuelle de cible, plusieurs informations sensorielles sont présentes, notamment la vision du membre et son ressenti par la proprioception. Le poids relatif de ces deux sources d'information pour le contrôle du mouvement a été le sujet de nombreuses études. Il a été démontré que ce poids relatif dépend des informations présentes : en condition de vision du membre, le poids des informations visuelles est prédominant par rapport à celui de la proprioception (et inversement en condition de non vision) (Proteau, 2005; Mackrout et Proteau, 2007;

Proteau et al., 1987; Sarlegna et Sainburg, 2007) et ce, notamment pour le contrôle en ligne du mouvement (Proteau, 2005; Mackrout et Proteau, 2007; Sarlegna et Sainburg, 2007). De plus, plus le rendement des corrections basées sur les informations visuelles est bon, plus au cours de la pratique un individu aura tendance à prioriser l'emploi de ce type d'information (Proteau et Isabelle, 2002). Cependant il est important de noter que lors d'une tâche où les informations visuelles sont priorisées, elles ne masquent pas les informations proprioceptives qui sont tout de même traitées et mémorisées par le système nerveux central (SNC) (Mackrout et Proteau, 2007). Le SNC est donc capable d'intégrer toutes les informations sensorielles et de leur attribuer un poids relatif tôt dans la pratique en fonction des caractéristiques de la tâche. Lors d'une tâche de pointage manuel en condition de vision, les informations visuelles seront donc particulièrement importantes pour le contrôle du mouvement.

#### **b. Traitement des informations visuelles « on line » et « off line » pour le contrôle en ligne du mouvement**

Deux processus ont été identifiés pour l'exécution d'un mouvement de pointage précis. Avant l'amorce du mouvement, le SNC programmerait le geste à effectuer ; ce processus est appelé planification. Ensuite, lors du mouvement, des corrections pour d'éventuelles erreurs de planification ou d'exécution seraient apportées ; ce processus est appelé contrôle en ligne. L'idée générale est que les informations sensorielles « off line » ou en différé (i.e., les informations non présentes lors de l'exécution d'un mouvement, comme par exemple les informations sensorielles provenant d'un essai antérieur) seraient intégrées par le système nerveux central afin d'améliorer la planification du mouvement suivant. À l'inverse, les informations disponibles « on-line » ou en temps réel (i.e., lors

du mouvement : la position de départ du membre, la localisation de la cible, la main en mouvement) permettraient, elles, de mieux corriger d'éventuelles erreurs de planification et d'exécution.

En effet, plusieurs auteurs ont démontré que les informations visuelles disponibles lors de l'exécution du mouvement (notamment celles de la main se dirigeant vers la cible) étaient traitées en temps réel pour le contrôle en ligne (Proteau, Roujoula et Messier, 2009; Saunders et Knill, 2003, 2004, 2005 ; Sarlegna et al., 2003, 2004), même celles situées dans le champ de vision périphérique (Abahnini, Proteau et Temprado, 1997; Bédard et Proteau, 2004).

Cependant, l'organisation du traitement des informations différées pour la planification et en temps réel pour le contrôle en ligne n'est pas si cloisonné. Proteau (2005) a mis en évidence le fait que les informations visuelles renseignant sur la position de la main par rapport à la cible à atteindre étaient traitées pour la planification et le contrôle du mouvement suivant. Plusieurs études ont permis de conforter ces résultats (Cheng, Luis et Tremblay, 2008; Sarlegna et Sainburg, 2007). Par exemple, Cheng et al. (2008) ont réalisé une expérience de pointage manuel où alternaient 1 à 4 essais pour lesquels la vision du membre était disponible (série FV) avec 1 à 4 essais pour lesquels la vision du membre n'était plus permise (série NV), et ainsi de suite pour un total de 271 essais par participant. À chaque fois, le premier essai de la série FV avait les mêmes propriétés que l'essai précédent de la série NV, c'est-à-dire une moins bonne précision, une plus grande variabilité et une meilleure prédictibilité entre début et fin de mouvement (signe de l'absence de corrections motrices en temps réel). De même, les premiers essais des séries NV avaient des propriétés similaires aux derniers essais des séries FV : une meilleure précision, une variabilité plus faible et une prédictibilité entre début et fin de

mouvement diminuée (traduisant la présence de correction lors de l'exécution du mouvement). Les auteurs ont conclu que les informations sensorielles différées seraient également utilisées par le SNC afin d'améliorer le contrôle en temps réel. Ainsi, il semblerait que le SNC est capable d'intégrer les informations sensorielles des expériences motrices passées et les informations sensorielles disponibles lors de l'exécution du mouvement dans le but de générer un contrôle en temps réel du mouvement et ainsi produire une réponse motrice optimale.

Dans la prochaine section, nous allons nous intéresser au rôle des différents types d'informations visuelles disponibles en temps réel pour le contrôle du mouvement. De nombreux auteurs se sont intéressés à ce sujet.

### **c. Traitement des informations visuelles statiques et dynamiques pour le contrôle en ligne du mouvement**

Deux types d'informations peuvent être dissociés : les informations statiques de la base de départ, de la cible à atteindre et de l'ensemble du contexte visuel, et les informations dynamiques du membre en mouvement.

#### **1. Rôle des informations visuelles statiques**

Lors d'un mouvement de pointage manuel, les informations visuelles statiques de la main reposant sur la base de départ et de la cible à atteindre sont traitées par le SNC. Prablanc, Echallier, Komilis et Jeannerod (1979a) ont montré lors d'une expérience de pointage manuel que retirer la vision de la cible à atteindre résultait en la mise en place d'un mouvement plus balistique et temporellement plus court que lorsque la cible reste visible durant la totalité de l'action. Puisque les sujets se reposent alors sur une stratégie plutôt en boucle ouverte, il est raisonnable d'imaginer que les informations visuelles

statiques relatives à la position initiale de la main et de la cible sont nécessaires à la planification du mouvement. Les mêmes auteurs (1979b) ont réalisé une expérience de pointage où la vision de la main sur la base de départ était soit présente soit éliminée avant l'amorce du mouvement. Cette dernière condition résultait en une baisse significative de la précision du mouvement, ce qui confirmait le rôle important des informations visuelles statiques pour la planification du mouvement.

Par la suite il a été observé que si l'information visuelle de la main reposant sur la base de départ était présente, la variabilité du mouvement diminuait (dans le cas où le membre en mouvement n'est pas visible) par rapport à la condition où elle ne serait pas présente (Bédard et Proteau, 2005; Desmurget, Rossetti, Prablanc, Stelmach et Jeannerod, 1995; Rossetti, Stelmach, Desmurget, Prablanc et Jeannerod, 1994). De plus, déplacer la base de départ en condition de non vision du membre en mouvement induit des erreurs de planification (Mackrout et Proteau, 2007). Ces informations joueraient donc un rôle important pour l'élaboration de la planification du mouvement, ce qui avait également été observé précédemment (Bédard et Proteau, 2001; Desmurget et al., 1995; Proteau et Isabelle, 2002; Rossetti et al., 1994).

L'information visuelle statique de la main sur la base de départ avant le lancement du mouvement a également été démontrée comme jouant un rôle important pour le contrôle en temps réel du mouvement. Par exemple, Bourdin, Bringoux, Gauthier et Vercher (2006) ont observé que lors d'une tâche de pointage manuel dans un champ de force, la présence des informations visuelles de la main avant l'amorce du mouvement permettait aux sujets une bien meilleure adaptation au champ (meilleure précision, effets consécutifs plus importants) que les sujets ayant pratiqué la tâche sans cette information.



Il a aussi été montré que la saccade oculaire (de la main reposant sur la base de départ à la cible à atteindre) transmettait une information supplémentaire sur la direction et l'amplitude du geste à effectuer permettant une meilleure précision du geste (Bédard et Proteau, 2001, 2005; Blangero, Luaute, Rode, Salemme, Guinard, Boisson, Rosetti et Pisella, 2008; Desmurget et al., 1995; Jackson, Newport, Mort et Husain, 2005; Vercher, Magenes, Prablanc et Gauthier, 1994). Cette information peut également être traitée par le SNC afin de corriger un mouvement en cours d'exécution (Blangero et al., 2008)

## **2. Rôle des informations visuelles dynamiques**

En présence de la vision du membre en mouvement, la précision d'un geste de pointage manuel est largement améliorée et la variabilité diminuée par rapport aux conditions où seules la main et la cible à atteindre sont visibles (Prablanc et al. 1979, Elliott, Carson, Goodman et Chua, 1991; Heath, 2005; Proteau, 2005; Proteau et al., 1987). On peut donc raisonnablement imaginer qu'en l'absence de cette information le contrôle en temps réel serait altéré.

Proteau et Isabelle (2002) ont réalisé une tâche de pointage manuel vidéo (le membre est non visible mais représenté par curseur sur un écran vertical) où les sujets participaient à une série d'essais d'acquisition soit en vision, soit en non vision du curseur, puis à une phase de transfert en condition de non vision du curseur. Ils ont observé qu'en présence des informations visuelles dynamiques, les sujets apportaient un plus grande correction finale de leur mouvement par rapport à la condition où seules la base de départ et la cible étaient visibles. Plus frappant encore, en phase de transfert, les sujets entraînés en vision du curseur ne présentaient plus ces corrections tardives du mouvement et se comportaient comme les sujets de la condition non vision du curseur en

phase d'acquisition. Cela soulignait le rôle des informations visuelles dynamiques pour le contrôle en temps réel et la précision terminale du mouvement.

Avec le même type de tâche (excepté que les cibles étaient mémorisées), Heath (2005) arrive à la même conclusion. Il observe une faible corrélation entre la trajectoire de début et de fin de mouvement, couplée d'une meilleure précision, quand la vision du curseur en cours de mouvement est permise par rapport à la condition où seules la base de départ et la cible sont visibles. Cela indique un rôle important des corrections basées sur le traitement des informations visuelles pour assurer la précision du geste.

Khan et Franks (2003) ont étudié plus en profondeur le rôle spécifique des informations visuelles dynamiques pour le contrôle en temps réel du mouvement en fonction du temps de mouvement. Les auteurs ont trouvé que pour un temps de mouvement compris entre 225 et 300 ms, les informations visuelles étaient plutôt traitées en faveur de la planification de l'essai suivant. Pour un temps de mouvement compris entre 375 et 400 ms, la vision dynamique de la représentation du membre en mouvement permettrait l'amélioration de la planification aussi bien que du contrôle en temps réel du mouvement. On peut donc raisonnablement en conclure que pour un temps de mouvement rapide mais confortable, les informations visuelles disponibles pourront être traitées surtout en faveur d'optimiser le contrôle en temps réel du mouvement (voir aussi Bédard et Proteau, 2004).

Nous avons vu précédemment une hypothèse à l'effet que les processus de planification et de contrôle en temps réel du mouvement étaient indépendants. Carlton (1981) a cherché à savoir si l'un et l'autre prenaient place à différents moments du mouvement. Il a montré que retirer le feedback visuel de la main dans les premiers 75% du mouvement n'altérait pas la performance des sujets, concluant que les informations

visuelles de la main au début du mouvement n'étaient pas traitées pour le contrôle en temps réel du mouvement. Cette hypothèse a été tempérée par la découverte que les sujets étaient capables de traiter de l'information visuelle de leur main en mouvement dès son initiation et cela même si les informations sont situées dans le champ de vision périphérique (Abahnini et al. 1997 ; Bard, Paillard, Fleury, Hay et Larue, 1990 ; Bédard et Proteau, 2004).

### **III. Mise en évidence du contrôle en ligne**

On a vu que le contrôle en temps réel du mouvement avait pu être mis en évidence lors de tâches de pointage manuel non perturbées. Cependant, d'autres méthodes ont été employées pour étudier spécifiquement les différentes caractéristiques de ce processus. Certaines d'entre elles sont exposées dans cette section.

#### **a. Paradigme du saut de cible**

Assez tôt, pour mettre en évidence le contrôle en ligne du mouvement, l'idée de déplacer soudainement et imprévisiblement la cible lors du mouvement a émergé. Ainsi, les chercheurs pouvaient déterminer si les individus étaient capables de modifier leur mouvement pour atteindre la nouvelle position de cible. Par exemple, Soechting et Lacquaniti (1983) ont utilisé une tâche de pointage vidéo pour laquelle la cible était déplacée pour certains essais (aléatoirement désignés) dans le plan sagittal (plan de réalisation de la tâche) et à environ 50% du temps de mouvement. Les variations des amplitudes de déplacement du coude et de l'épaule ont été comparées entre les conditions où la perturbation prenait place et les conditions contrôles sans perturbation. Il a été observé que la position finale de la main se rapprochait significativement de la nouvelle

position de la cible et, conséquemment, que l'amplitude des déplacements articulaires était semblable à celle retrouvée pour atteindre la nouvelle cible en condition contrôle. Les auteurs ont ainsi mis en évidence que le SNC est capable de traiter les informations visuelles présentes en cours de mouvement afin d'adapter celui-ci pour rediriger la main vers la cible. Cela permet, au quotidien, de pouvoir gérer toute modification soudaine de l'environnement.

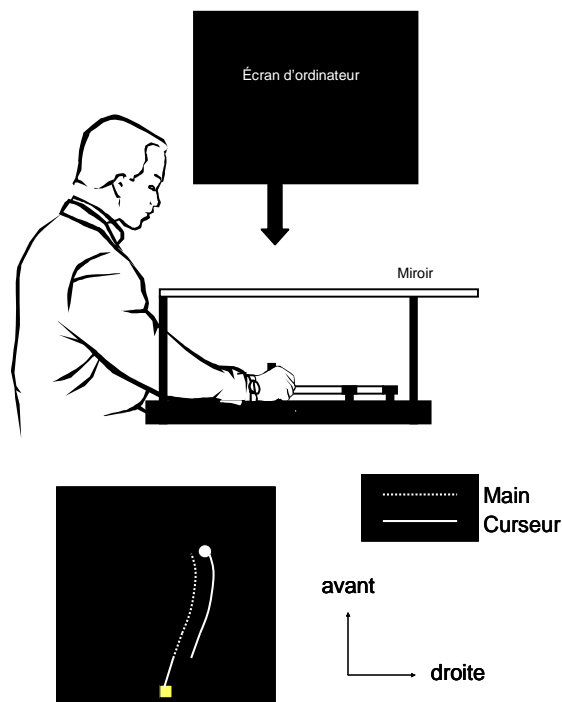
De même, Prablanc et Martin (1992) ont utilisé le paradigme de saut de cible pour mettre en évidence la présence d'un contrôle en temps réel. Lors de tâches de pointage manuel sur une surface horizontale, la position de la cible était perturbée latéralement pour certains essais lors de la saccade oculaire précédant l'amorce du mouvement. Ainsi les sujets n'étaient pas conscients qu'une perturbation avait parfois lieu. Or, des corrections rapides (145 à 174 ms de latence) permettaient de ramener la main vers la nouvelle position de la cible. La technique du saut de cible a été utilisée par de nombreux auteurs (Goodale, Pélisson et Prablanc, 1986; Pisella et al., 2000; Veerman, Brenner et Smeets, 2008) qui tous ont démontré une correction du mouvement pour s'adapter au changement de la position de la cible.

#### **b. Paradigme de perturbation de la position de la main ou de sa représentation visuelle**

Puisqu'il est largement accepté que le contrôle en temps réel servait à corriger d'éventuelles erreurs de planification ou d'exécution du mouvement, certains auteurs ont utilisé un paradigme de perturbation de l'effecteur ou du curseur déplacé par le sujet sur un écran vidéo. Des perturbations mécaniques (à l'aide d'un jet d'air comprimé) du membre en mouvement ont été utilisées (Grierson et Elliott, 2008), mais elles ont pour

inconvenient de manquer de précision, d'être perçues par le sujet et de perturber en parallèle la proprioception du sujet.

Une autre méthode possible pour induire une erreur de planification est le « saut de curseur ». Lors d'une tâche de pointage manuel où la cible est située sur un écran, la main du sujet est représentée par un curseur visible sur ce même écran et le sujet doit le déplacer d'une base de départ fixe vers la cible. Il est alors possible d'induire un décalage entre la position réelle de la main et sa représentation visuelle (i.e., le curseur). Si ce décalage prend place à l'amorce du mouvement ou tôt après celle-ci, le sujet est contraint de modifier la trajectoire de sa main pour atteindre la cible visée. La figure ci-dessous illustre ce paradigme (Figure 1).



**Figure 1** : *exemple d'une perturbation du feedback visuel de la main par un saut de curseur sur un écran vidéo horizontal*

Il est important de noter que pour cette méthode, le saut n'est pas perçu consciemment par le sujet s'il se situe lorsque celui-ci oriente son regard vers la cible juste avant l'amorce du mouvement (i.e., lors de la saccade oculaire, Sarlegna et al., 2004) ou alors que le curseur se situe en vision périphérique ( $> 25^\circ$  d'angle visuel, Proteau et al., 2009 ; voir aussi Saunders et Knill, 2003, 2004, 2005).

Le saut de curseur est généralement introduit aléatoirement et de manière imprévisible au sein d'un bloc d'essais contrôles (sans perturbation) afin d'éviter un phénomène d'adaptation à la perturbation. Ainsi, plus le pourcentage d'essais perturbés par rapport aux essais contrôles diminue, plus ce phénomène est contrôlé. Dans la littérature, on retrouve des pourcentages allant de 20% à 88% d'essais perturbés (Cheng et Sabes, 2007; Franklin et Wolpert, 2008; Grierson et Elliott, 2008, 2009; Proteau et al., 2009; Sarlegna, Blouin, Vercher, Bresciani, Bourdin et Gauthier, 2004; Sarlegna, 2006; Sarlegna et Sainburg, 2007 ; Saunders et Knill, 2003, 2004, 2005). Dans tous les cas, on note que les sujets ont corrigé leur mouvement pour éliminer une partie de l'erreur induite par le saut de curseur.

#### **IV. Automaticité et bases neurophysiologiques pour le contrôle en temps réel du mouvement : paradigme du saut de cible**

Le rôle du cortex pariétal postérieur pour le contrôle en temps réel du mouvement en réponse à un saut de cible a été démontré par Desmurget et al. (1999) à l'aide de la technique de stimulation magnétique transcrânienne (TMS). En effet, les auteurs ont observé que l'application de TMS au niveau de la région pariétale de l'hémisphère gauche (inhibant l'activité de cette zone) entraînait la suppression des réponses

correctives observées habituellement suite à un saut de cible, et cela seulement pour le membre opposé (membre supérieur droit pour une stimulation pariétale gauche).

Pisella et al. (2000) se sont alors intéressés à la question de l'automatisme de ces corrections. Pour un premier groupe expérimental, lors d'un saut de cible, les sujets devaient pointer vers la nouvelle position de la cible alors que les sujets d'un deuxième groupe devaient stopper leur mouvement. Pour deux autres groupes, il n'y avait pas de saut de curseur. Toutefois, si la couleur de la cible changeait au cours de l'essai, les sujets devaient atteindre une autre cible ou stopper leur mouvement. Pisella et al. (2000) ont observé que lors d'un signal stop pour un saut de cible, les sujets pointaient tout de même spontanément vers la nouvelle position de la cible, allant à l'encontre de la consigne. Le signal stop par changement de couleur de la cible n'entraînait pas cet effet. Les auteurs ont donc pu en conclure qu'une consigne volontaire ne pouvait pas empêcher la correction de se dérouler, mais cela spécifiquement pour une perturbation spatiale de l'objectif à atteindre. Les auteurs se sont alors intéressés aux structures corticales responsables du traitement et la mise en place de ce type de réponse. Ils ont répété leur expérience avec une patiente atteinte d'une lésion bilatérale du cortex pariétal postérieur. Ils ont observé que la patiente n'était pas capable de produire une correction aussi rapide et précise que des sujets sains lors d'un saut de cible et qu'elle n'avait pas de difficulté à se conformer à la consigne d'arrêt du mouvement. Les auteurs ont conclu que le cortex pariétal postérieur joue un rôle important dans le contrôle en temps réel du mouvement via le traitement des informations visuelles relatives au déplacement de la main. Ainsi, il semble possible de traiter de l'information visuelle en cours de mouvement sans atteindre le niveau de 'conscience'.

Certains chercheurs se sont alors demandés si une charge attentionnelle accrue pouvait parasiter la mise en place de ce mécanisme, et plus précisément si le fait de recruter les voies visuelles ventrales (plus spécialisées dans l'identification consciente des objets) pouvait diminuer les capacités du SNC pour la planification et le contrôle en ligne du mouvement. À cet effet, deux voies visuelles peuvent être distinguées (Goodale, Milner, Jakobson et Carey, 1991): l'une pour l'action (la voie dorsale) qui atteint le cortex pariétal postérieur et une pour la reconnaissance des objets (la voie temporale) qui migre vers le lobe temporal médian, le système limbique, mais aussi la voie dorsale.

Veerman et al. (2008) ont utilisé une tâche de pointage manuel. Les sujets devaient diriger un stylet sur une table horizontale vers une cible projetée sur cette table. Pour certains essais, les caractéristiques de la cible (couleur, forme texture, luminosité, orientation ou taille) variaient aléatoirement. Spécifiquement, pour 50% des essais, la cible à atteindre était soudainement déplacée en direction 62 ms après l'amorce du mouvement et apparaissait avec une des modifications précisées plus haut. Les auteurs ont observé une augmentation de la latence de correction seulement pour les changements en orientation, luminosité et taille, ce qui correspond assez bien aux informations transitant par la voie dorsale. Les informations traitées par la voie ventrale n'entraînaient pas cette interférence (voir aussi Liu, Chua et Enns, 2008). Pour résumer, les corrections motrices en réaction à un saut de cible ont été décrites comme rapides, automatiques, réalisées sans atteindre le niveau de la conscience et ce grâce à un « pilote automatique » : le cortex pariétal postérieur qui reçoit notamment des afférences de la voie visuelle dorsale, ou « de l'action ». Mais qu'en est-il des réponses motrices observées suite à une perturbation de l'effecteur ?



## **V. Les caractéristiques de la réponse corrective suite à une perturbation du feedback visuel de la main**

Nous avons vu que plusieurs chercheurs proposaient que le contrôle en temps réel du mouvement servait à corriger d'éventuelles erreurs de planification et d'exécution mais uniquement vers la fin du mouvement (après le pic de vélocité), alors que la main se rapproche de la cible à atteindre. Saunders et Knill (2003) ont voulu déterminer si des corrections plus hâtives pouvaient être observées.

Dans leur étude, des sauts de curseur (méthode exposée ci-dessus) pouvaient se produire à 25 ou 50% de l'amplitude du mouvement à produire. Ils ont observé que les participants corrigeaient leurs mouvements pour les deux lieux de perturbation avec une amplitude comparable et avec le même temps de latence (160 ms en moyenne). Les auteurs ont conclu que l'être humain est capable de traiter les informations visuelles en temps réel tout au long du mouvement (voir aussi Elliott et al., 1991; Soechting et Lacquaniti, 1983) et non seulement en fin de mouvement. Dans la même veine, Proteau et al. (2009) ont aussi démontré que les participants amorçaient une correction pour un saut de curseur alors que celui-ci était visible seulement en vision périphérique (15° d'angle visuel) et avec une latence comparable à celle rapportée par Saunders et Knill (2003).

Saunders et Knill (2004) ont ensuite voulu savoir si le feedback visuel de la main en mouvement était traité autant en direction qu'en distance. Pour cela, une première perturbation de curseur se faisait dans le sens du mouvement (amplitude) alors que la seconde était orthogonale au sens du mouvement (direction). Des corrections ont été observées pour les deux types de perturbations, suggérant que le traitement de cette information visuelle est utilisé pour ces deux paramètres du mouvement.

Sarlegna, Blouin et al. (2004) ont voulu déterminer si le SNC était capable d'adapter sa réponse corrective à l'amplitude de la perturbation induite. Des sauts de curseur de 1 à 4 cm perpendiculaires au sens du mouvement ont été utilisés. Les auteurs ont rapporté que les corrections étaient proportionnelles à l'amplitude du saut de curseur. Cependant, les sujets corrigeaient pour seulement 45% de l'amplitude du saut de curseur. Depuis, des pourcentages de correction allant de 50 à 92% de l'amplitude du saut de curseur ont été rapportés dans la littérature (Franklin et Wolpert, 2008; Proteau et al., 2009 ; Sarlegna, 2006; Saunders et Knill, 2003, 2004, 2005, voir aussi Brenner et Smeets, 2003). Il est cependant difficile de comparer ces résultats entre eux du fait de différences de procédures importantes d'une étude à l'autre (montage utilisé, proportion des essais avec saut de curseur, amplitude du saut de curseur, temps de mouvement imposé, perception consciente ou non du saut de curseur). Toutefois, puisque toutes les perturbations sont corrigées (jusqu'à un certain pourcentage) avec un temps de latence court et relativement constant d'une étude à l'autre, et même alors que les sujets ne sont pas conscients qu'une perturbation a pris place, on peut proposer que les corrections en temps réel orchestrées par le SNC relèvent d'un processus relativement automatique.

## **VI. Automaticité du contrôle en temps réel du mouvement : paradigme du saut de curseur**

Les corrections observées suite à une perturbation de la position de la cible ou de l'effecteur sont souvent considérées comme l'expression d'un même processus de contrôle en temps réel. Au vu des caractéristiques des corrections en ligne présentées plus haut, il paraît plausible que ce processus relève du même pilote automatique que celui mis en jeu pour les corrections apportées lors des sauts de cible. À cet effet, Franklin et

Wolpert (2008) ont voulu déterminer si la réponse correctrice observée suite à un saut de curseur pouvait être considérée comme réflexe.

Une première expérience consistait en une tâche de pointage manuel vers une cible visuelle. Les sujets avaient le bras maintenu par un système mécanique, ce qui empêchait leur mouvement de dévier d'un couloir défini par le vecteur « base de départ – cible ». Une déviation passagère (230 ms pour un temps de mouvement total de 700 ms environ) du curseur était induite par l'expérimentateur. Des mesures des forces musculaires des principaux muscles agonistes et antagonistes ont été prises lors de l'exécution des mouvements. Les auteurs ont observé une contraction musculaire opposée à la perturbation même lorsque les sujets avaient pour consigne de réagir le plus rapidement possible dans le sens de la perturbation. Ces résultats mettent à jour la grande automaticité d'un processus correction en ligne qui ne peut être inhibé même volontairement.

Dans une seconde expérience, les auteurs étudièrent les corrections apportées suite à des perturbations du feedback visuel de la main (pour 30% des essais) d'apparition progressive et pouvant avoir différentes amplitudes. Aucun feedback terminal n'était donné afin d'éviter tout processus d'adaptation. Cependant, dans une première condition, la perturbation était maintenue tout au long du mouvement (« task relevant »), alors que dans une seconde, elle était passagère (« task irrelevant »). Les auteurs ont observé que pour la seconde condition, les participants cessaient de corriger leur mouvement tard dans la pratique, ce qui suggère un aspect fonctionnel à cette correction. Toutefois, comme le paradigme expérimental permettait au sujet de déterminer qu'une correction pour le saut de curseur n'était pas nécessaire, voire même qu'elle nuisait à l'atteinte de l'objectif, ces résultats indiquent plutôt que l'individu peut apprendre à mettre en veilleuse le « pilote

automatique » lorsque le contexte fait que la position du curseur tôt dans le mouvement ne donne aucune information pertinente sur sa position tard dans le mouvement. Dans un tel contexte, et comme une seule cible était utilisée, il ne serait pas étonnant que les sujets aient appris à diminuer l'importance accordée aux informations visuelles, parce que non fidèles et valides, et à augmenter l'importance accordée aux informations proprioceptives pour le contrôle du mouvement, ce qui expliquerait les résultats observés.

Concernant l'aspect de la fonctionnalité des corrections pour un saut de curseur, Brenner et Smeets (2003) ont réalisé une expérience où des sauts de cibles et des sauts de curseur prenaient place simultanément mais dont les effets s'annulaient. Par exemple, tôt après le mouvement la cible et le curseur pouvaient être déplacés de 2 cm sur la gauche. La relation entre la cible et le curseur était donc préservée et aucune correction n'était requise pour l'une ou l'autre de ces perturbations. Cette procédure permettait de déterminer si le « pilote automatique » est vraiment automatique ou s'il possède aussi un aspect fonctionnel. Brenner et Smeets (2003) rapportent que la trajectoire du mouvement semble sommer les corrections requises par le saut de cible et par le saut de curseur. Le pilote automatique n'aurait donc pas de considérations fonctionnelles. Cependant, les résultats de cette étude doivent être considérés avec prudence parce que les conclusions présentées par ces auteurs semblent être basées sur une inspection des figures plutôt que sur des analyses statistiques.

## CONTEXTE DU MÉMOIRE

---

Nous avons vu que le contrôle en temps réel du mouvement permettait de corriger les erreurs de planification et d'exécution du mouvement. Ses caractéristiques hautement automatiques permettent la correction rapide, fluide et efficace du mouvement de pointage sans parfois même atteindre un niveau de conscience pour le sujet. Cependant, si l'on se réfère à la théorie d'intervention minimale de Todorov (Todorov, 2004 ; Todorov et Jordan, 2002), de telles corrections ne devraient être amorcées que lorsque l'atteinte de l'objectif est mis en danger. Toutefois, tel que proposé dans les nombreuses variantes des modèles hybrides du contrôle moteur, des corrections seront apportées si les conséquences sensorielles du mouvement ne correspondent pas à celles qui étaient attendues (Abbs, Gracco et Cole, 1982 ; Desmurget et Grafton, 2000 ; Schmidt, 1975). Le but de ce mémoire était de déterminer si le processus automatique de correction en temps réel pour une perturbation de l'effecteur est basé uniquement sur une comparaison entre la conséquence sensorielle attendue et celle obtenue ou s'il peut être modulé par les caractéristiques de la cible à atteindre, et plus spécifiquement par le besoin fonctionnel de corriger.

**ARTICLE SCIENTIFIQUE**

---

**Automaticity vs. functionality of online control processes in manual aiming**

**Automaticity vs. functionality of online control processes in manual aiming**

Marie Veyrat-Masson, Julien Brière<sup>1</sup> and Luc Proteau<sup>1</sup>

Département de kinésiologie

Université de Montréal

<sup>1</sup> Corresponding author: Département de kinésiologie, Université de Montréal, C.P. 6128,  
Succursale Centre Ville, Montréal, Canada, H3C 3J7

**Key words:** manual aiming, visual feedback, online control, automatic pilot, cursor-jump

### **Abstract**

Cursor-jump experiments have suggested the existence of quick, efficient, automatic and even reflexive (Franklin and Wolpert, 2008) online correction processes in manual aiming movements. In the present study, we wanted to determine whether corrections for a cursor jump are purely automatic/reflexive or whether they are functional in that they occur only when they are required for the target to be reached. In a first experiment, we used different target sizes (5 mm to 30 mm) and cursor-jump amplitudes (5 mm to 25 mm) so that for some target size/cursor-jump combinations, no correction would be needed to reach the target. In all cases, we observed a correction for the cursor-jump. This correction reduced the error induced by the cursor jump by 60-70%, regardless of target size. In a second experiment, we asked participants to point at a large wedge (30° of circular arc). For some trials, a cursor-jump translated the location of the cursor laterally by 15 mm soon after movement initiation. Participants never consciously detected the cursor-jump but clearly modified the trajectory of their movement in the direction opposite to that of the cursor-jump. These corrections were smaller than those observed in the first experiment (42% of the cursor-jump). Our results indicate that the initiation of a correction for a cursor-jump is more reflexive than it is functional. A second correction process would tailor the movement's initial impulse based on the target characteristics.



### **Automaticity vs. functionality of online control processes in manual aiming**

Reaching movements toward a visual target puts into play a series of processes to identify the target and its location and transform this information into appropriate motor commands (for a review see Desmurget et al. 1998). The processes leading to movement planning and then to movement execution have intrinsic variability. Because of this variability inherent to all biological systems, and because of the high level of accuracy required in many of our daily activities, the CNS must quickly update movement planning and amend movement execution.

Error detection and correction processes have been at the center of many research efforts since the seminal work of Woodworth (1899). Although many research strategies have been used in the last century, many authors opted to use a perturbation paradigm. In this paradigm, some aspects of the task are changed just prior to, at, or soon after movement initiation. Because these perturbations occur unexpectedly and often for only a small proportion of the trials, it is expected that participants would plan their movements as if no perturbation would occur. Thus, to reach the target, participants need to correct the movement they have planned and initiated to counteract the perturbation, which opens a window on error detection and correction processes.

In many experiments, the perturbation changed target location or the visually perceived location or velocity of the participant's hand. In target-jump experiments (Bridgeman et al. 1979; Desmurget et al. 1999; Goodale et al. 1986; Pisella et al. 2000; Prablanc and Martin 1992) participants first gazed at a fixation point and, following a variable foreperiod, a target was lit in his or her peripheral visual field. Participants were asked to look and to aim at the target quickly and accurately. Once the eyes' movement reached peak velocity (i.e., during the saccadic suppression period), the location of the

target was switched to a different one. Results revealed that although participants were unaware of the target-jump, they quickly and accurately modified the trajectory of their hand (or cursor) so that their movement ended close to the target. Because participants could not refrain from initiating a correction toward the new target location (Johnson et al. 2002; Pisella et al. 2000), it was concluded that an ‘automatic pilot’ drives fast corrective arm movements (but see also Cameron et al. 2007). Similar observations were reported in cursor-jump experiments (Brenner and Smeets, 2003; Franklin and Wolpert 2008; Proteau et al. 2009; Sarlegna et al. 2003, 2004; Saunders and Knill 2003, 2004, 2005).

Typically, in cursor-jump experiments, participants moved a cursor shown on a visual display to a target illustrated on the same display. The location of the cursor representing the participant’s hand could be translated, for example by 2 cm, soon after movement initiation. Again, participants were unaware of the cursor-jump (no participant reported having consciously perceived the jump) but nonetheless corrected their movement in the direction opposite to the cursor-jump. Because efficient corrections were apparent even for the first - and not consciously perceived - perturbed trial to which participants were exposed (Proteau et al. 2009), it was concluded that these error detection and correction processes did not require learning or adaptation. Also, because participants could not refrain from initiating a correction in the direction opposite to the cursor jump (Franklin and Wolpert 2008), even when asked to move their hand in the same direction as the cursor-jump, it was proposed that the correction was reflexive. However, in the latter study, participants were obviously aware of the cursor-jump, which might have put into play a different error detection and correction processes than when the cursor-jump is not consciously perceived by the participants.

In the present study, we were interested in the apparent automatic (and perhaps even reflex-like) nature of the correction for a cursor-jump. To our knowledge, this is the first attempt to determine whether this correction is uniquely driven by the stimulus (i.e., the cursor-jump) or whether it takes into consideration the participant's goal. Specifically, will we observe a correction when the size of the cursor-jump is such that it would not jeopardize reaching the target? Are the latency and the gain of the correction only influenced by the characteristics of the cursor-jump? If so, it would suggest that this correction process is largely if not solely based on a comparison between expected sensory consequences that can be derived from a forward-model of movement control and actual feedback, which drives a correction process as soon as the movement deviates from its intended trajectory, rather than on a comparison between the position of the hand relative to the target.

## **Experiment 1**

### **Method**

#### *Participants*

Thirty-six young adults (18-25 years old) took part in this experiment. They were all naïve regarding the goal of the study. All participants were self-declared right-handed and reported normal or corrected-to-normal vision. They took part in a single 40-minute experimental session and were paid CAN 10\$ for their time. The Health Sciences Ethics Committee of the Université de Montréal approved this study.

#### *Task and apparatus*

The task was to move a computer mouse-like device from a fixed starting position located close to the body, toward one of two possible targets located further away from

the body. The apparatus is illustrated in Figure 1. It consisted of a table, a computer screen, a headrest, a mirror, and a two-degrees-of-freedom manipulandum.

Participants sat in front of the table. The computer screen (cathode ray tube, Mitsubishi, Color Pro Diamond 37 inches, refresh rate 60 Hz) was mounted face down on a ceiling-support positioned directly over the table; the computer screen was oriented parallel to the surface of the table. Its image was reflected on a mirror placed directly beneath it and parallel to the tabletop and, thus, was visible to the participant. The distance between the computer screen and the mirror was 20 cm, while the distance between the mirror and the tabletop was 20 cm, which permitted free displacement of the manipulandum on the tabletop. A headrest was affixed on the side of the computer screen. It was aligned with the lateral center of the computer screen, which standardized for all participants the information reflected on the mirror.

The tabletop was covered by a piece of Plexiglas over which a starting base and the manipulandum were affixed. The starting base consisted of a thin strip of Plexiglas glued to the tabletop. It was parallel to the leading edge of the table and had a small indentation on its distal face. This indentation was aligned with the headrest and the participant's midline and served as the starting base for the stylus (see below). The indentation made it easy for the participant to position the stylus at the beginning of each trial.

The manipulandum consisted of two pieces of rigid Plexiglas (43 cm) joined at one end by an axle. One free end of the manipulandum was fitted with a second axle encased in a stationary base. The other free end of the manipulandum, hereafter called the stylus, was fitted with a small vertical shaft (length: 3cm, radius: 1 cm), which could be easily gripped by the participant. From the participant's perspective, the far end of the manipulandum was located 40 cm to the left of the starting base and 70 cm in the sagittal

plane. Each axle of the manipulandum was fitted with a 13-bit optical shaft encoder (U.S. Digital, model S2-2048, sampled at 500 Hz, angular accuracy of  $0.0439^\circ$ ), which enabled us to track the displacement of the stylus on-line and to illustrate it with a 1:1 ratio on the computer screen. Displacement of the stylus resulted in an identical and superimposed displacement of the cursor on the computer screen. The bottom of the stylus and the bottom of the optical encoder located at the junction of the two arms of the manipulandum were covered with a thin piece of Plexiglas. By lubricating the working surface at the beginning of each experimental session, displacement of the stylus was near frictionless.

### *Procedures*

Participants used their right dominant hand to move a cursor shown on the computer screen toward targets illustrated on the same screen. Participants performed 10 familiarizing trials, followed by 160 experimental trials. For all trials, the yellow cursor (5 mm in diameter) and the white targets (see below) were illustrated on a black background. The cursor and target remained visible throughout movement execution.

For the familiarization trials, the targets (5 mm in diameter) were located at 320 mm from the starting base and located at every  $10^\circ$  to the right and left of the starting base (from  $-50^\circ$  to  $+50^\circ$ ). The experimental trials were equally divided among two target locations ( $7.5^\circ$  and  $15^\circ$  to the right of the participant's midline) and two target sizes (5 mm or 30 mm in diameter). In all cases the distance between the starting base and the center of the target was 300 mm. For each target location/target size combinations, a cursor-jump occurred for 20% of the trials (8 of 40 trials aimed at each target). Thus, overall there were 32 cursor-jump trials and 128 no-jump trials. Target and cursor-jump

trials were presented randomly with the restriction that cursor-jump trials were separated by at least 2 no-jump trials.

Participants were assigned randomly to one of three groups ( $n = 12$ ). For the first group, the cursor-jump was of 5 mm, whereas it was of 15 mm or 25 mm for the two remaining groups, respectively. The cursor-jump occurred 100 ms (plus an additional random delay fluctuating between 14 ms and 21 ms due to equipment) after movement initiation and translated the position of the cursor perpendicularly to a straight line connecting the starting base and the center of the target. The cursor always jumped to the right. Thus, a correction for the cursor jump would be observed if the position of the stylus migrated closer to the participant's midline for the cursor jump than for the no jump trials.

At the beginning of each trial, all participants could see the cursor they had to move resting on the starting base. A target was presented once the stylus was stabilized on the starting base for 500 ms. Participants were asked first to gaze at the target and then to initiate a single straight and smooth movement (i.e., no stop and go) as they pleased (i.e., not a reaction-time task). They also were required to complete their movement in a movement time ranging between 680 ms and 920 ms (800 ms  $\pm$  15%). During data acquisition, movement initiation was detected when the cursor had been moved by 1 mm, whereas movement completion was detected when the cursor did not move by more than 2 mm in a time frame of 100 ms. A preliminary study revealed that the procedure we used to detect movement completion made it difficult for participants to use a stop and go strategy. When movements were completed outside the prescribed movement time bandwidth, the participant was reminded of the target movement time. A movement time bandwidth (Proteau et al. 2009; Saunders and Knill 2003, 2004, 2005) reduces the

possibility of different speed-accuracy trade-offs between the different experimental conditions (Fitts 1954).

#### *Data reduction*

The tangential displacement data of the stylus over time were first smoothed using a second order recursive Butterworth filter with a cutting frequency of 10 Hz. The filtered data were then numerically differentiated once using a central finite technique to obtain the velocity profile of the aiming movement, a second time to obtain the acceleration profile, and a third time to obtain a jerk profile. From the kinematic profiles, we determined the end of the movement's primary impulse (Meyer et al. 1988). It occurred when one of the following events was detected on the kinematic profiles: (a) movement reversal (velocity going from positive to negative), (b) movement lengthening (presence of a secondary movement impulse as indexed by the acceleration profile crossing the zero value for a second time) or (c) a significant disruption in the deceleration profile as indexed by zero-crossing on the jerk profile. For a secondary movement impulse to be considered a discrete correction, its duration had to be of at least 80 ms and its extent had to be of at least 2 mm. Note that less than 3.5% of the trials in all conditions showed a secondary corrective impulse. These trials were withdrawn from all analyses.

To provide a quick feedback to the participant during data acquisition, movement initiation was detected once the stylus had been moved by 1 mm. However, for the main analyses, movement initiation was defined as the moment at which the tangential velocity of the cursor reached 10 mm/s and was maintained above this value for at least 20 ms. Visual inspection of the data revealed that once the 10 mm/s had been reached movements were clearly underway.

To determine the efficacy of the correction for the cursor jump, we determined the end of the movement's primary impulse for all trials (hereafter called movement endpoint). Note that the data reported concern the position of the stylus moved by the participants, not that of the cursor shown on the computer screen. Endpoint frontal and sagittal errors were computed in Cartesian coordinates. They refer to the position of the stylus in relation to the center of the target. The frontal error was the signed difference on the frontal axis (in mm) between the movement endpoint and the target. A positive value indicates a movement ending to the right of the target, whereas a negative value indicates a movement ending to the left of the target. The sagittal error of a trial was defined as the signed difference between movement endpoint and the target on the sagittal axis (in mm). A positive value indicates that the target had been overshoot, and a negative value that it had been undershot. For all groups and conditions, data that differed by more than two standard deviations from the cell mean were excluded from all analyses; less than 3% of the trials were excluded. From these data, we computed the constant and variable aiming errors on the direction and extent dimensions of the task. The constant error is the mean signed difference between the target and endpoint location. It indicates whether participants showed a bias in their movements (too long, too short, to the right, or to the left of the target). The variable error is the within-participant variability in endpoint location.

To avoid repetitions and facilitate reading of this article, details concerning the dependent variables of interest and the statistical analyses that were computed are defined at the beginning of each subsection of the results presentation. All significant main effects and interactions involving more than two means were broken down using Dunn's procedures. All effect are reported at  $p < .05$  (adjusted for the number of comparisons



using Bonferonni's technique). Data of one participant in the 25 mm cursor-jump group were excluded from all analyses because they differed by more than two standard deviations from the mean results of that group.

## **Results**

### *Cursor-jump was not consciously detected*

Even after having been debriefed, participants reported that they were not aware that the cursor jumped on some trials. This aspect of the results replicates previous observations (Bédard and Proteau 2003; Brière and Proteau, 2010; Proteau et al. 2009), even when a cursor jump occurred for a high proportion of the trials (although during saccadic visual suppression, Sarlegna et al. 2003, 2004; see also Saunders & Knill, 2003, 2004, 2005). It should be noted that on average the cursor-jump occurred at  $38.7^\circ$  (SD =  $2.5^\circ$ ) of visual angle, which is quite far in the periphery of the retina and likely explains why participants did not notice them.

### *Correction for a cursor-jump*

In the present section we wanted to determine whether, and if so how efficiently, participants corrected their movements for different sizes of cursor-jump and targets. Examples of stylus trajectories of control and cursor-jump trials aimed towards the different targets are illustrated in Figure 2. This figure clearly illustrates that these participants corrected their movements for the cursor-jump. In addition, they show larger corrections for larger cursor-jumps (Brière and Proteau, 2010; Sarlegna et al., 2004), regardless of target location or target size. It should also be noted that movement endpoint of control trials are located near the center of the target, regardless of its size.

Mean movement endpoint and mean intra-participant variability of all participants are illustrated on Figure 3. Because target location had no significant effect on endpoint

accuracy or variability, data of the two target locations were collapsed in the following statistical analyses. Endpoint constant and variable frontal and sagittal errors and movement time data were submitted individually to an ANOVA contrasting 3 Groups (5, 15, or 25 mm cursor-jump), 2 Types of trials (no-jump vs. cursor-jump), and 2 Target sizes (5 mm and 30 mm in diameter) using repeated measurements on the last two factors.

*Endpoint constant error.* The ANOVA computed on the frontal constant error revealed a significant Group x Type interaction,  $F(2, 32) = 66.4, p < .001$ . The breakdown of this interaction revealed that endpoint of cursor-jump trials was significantly to the left of endpoint of no-jump trials for both the 5 mm (3.3 mm,  $p < .001$ ), 15 mm (9.9 mm,  $p < .001$ ) and 25 mm groups (16.0 mm,  $p < .001$ ). This indicates that participants corrected their movements even for the smallest cursor-jump. The interaction revealed that the correction grew larger as cursor-jump size increased. Neither the Target size main effect,  $F(1, 32) = 1.60, p = .21$ , nor any interaction involving that factor ( $p > .13$  for all interactions) were significant. The ANOVA computed on the sagittal constant error did not reveal any significant main effect or interaction ( $p > .16$  for all main effects and interactions).

*Endpoint variable error.* The ANOVAs computed on frontal and sagittal endpoint variable error did not reveal any significant main effect or interaction ( $p > .30$  for all main effects and interactions). On average (see Figure 3), endpoint variability for the cursor-jump and no-jump trials were of 5.71 mm and 5.96 mm on the frontal component of the task and of 7.37 mm and 7.76 mm on its sagittal component, respectively.

*Movement time.* The ANOVA computed on movement time revealed two significant interactions (see Table 1). First, the breakdown of the Type x Target size interaction,  $F(2, 32) = 6.741, p = .014$ , revealed significantly longer movement times for

cursor-jump than for no-jump trials. This difference was significantly larger when aiming at the 5 mm (692 ms vs. 681 ms,  $p < .001$ ) rather than at the 30 mm (688 ms vs. 680 ms,  $p = .051$ ) target. Second, the breakdown of the Group x Type interaction,  $F(2, 32) = 7.868$ ,  $p = .002$ , revealed significantly longer movement times for the cursor-jump than for the no-jump trials for the 25 mm (677 ms vs. 670 ms,  $p = .001$ ) and 15 mm (708 ms vs. 692 ms,  $p < .001$ ) cursor-jumps, but not for the 5 mm cursor-jump (686 ms vs. 680 ms,  $p = .845$ ).

### **Characteristics of the correction**

To determine when participants initiated a correction for a cursor jump, we used the unfiltered displacement data of the stylus on the frontal axis. As in previous work from our lab (Brière and Proteau 2010; Proteau et al. 2009), we chose to analyze the frontal displacement of the cursor because the cursor jump, and thus the expected correction, largely occurred on this axis. For each participant, we computed a mean trajectory for jump and no-jump trials aimed at each target. Then, at every 20 ms, we computed the difference in location between these mean trajectories. A correction for the first cursor-jump was detected when (a) cursor-jump trials deviated from the no-jump trials by more than 1 mm in the direction opposite to the cursor jump compared with the position of the cursor at the occurrence of the cursor jump and (b) continued to deviate as movements progressed toward the targets. The 1 mm criterion was chosen arbitrarily. However, to ensure that we did not have a false positive, movement onset was detected only when the change in direction continually increased as movement unfolded and eventually became significant. This technique was used by Proteau et al. (2009), who reported latency in the same range as that reported by others (Brenner and Smeets 2003; Saunders and Knill 2003, 2005). Finally, and perhaps more importantly, it should be remembered that the

absolute value of the latency is not our point of interest. What is important is to determine with the same method whether the latency differed across experimental conditions.

The latency data were submitted to a 3 Groups (5, 15, or 25 mm cursor-jump) x 2 Target sizes (5 vs. 30 mm) ANOVA using repeated measurements on the second factor. Note that 2 participants from the 5 mm group were excluded from this analysis because they showed no evidence of a correction, and therefore correction latency could not be computed. The ANOVA did not reveal any significant main effect ( $F_s < 1$ ,  $p > .64$ ) or interaction,  $F(2, 30) = 1.374$ ,  $p = .27$ . Mean latency data fluctuated between 137 ms and 172 ms (see Table 2). The correction was initiated when the cursor reached  $11.1^\circ$  ( $SD = 6.2^\circ$ ) of visual angle.

Finally, to determine whether the initial portion of the correction was related to the size of the cursor-jump, we computed the slope of this correction. Specifically, for each participant we determined by how much the mean trajectory of cursor-jump trials deviated from that of control trials 200 ms after a correction had been detected. The ANOVA computed on this dependent variable revealed a significant main effect of cursor-jump size,  $F(2, 30) = 43.09$ ,  $p < .001$ . Post hoc comparisons revealed that participants initiated a more abrupt correction as the size of the cursor-jump increased (17.15, 35.25, and 63.3 mm/s for the 5, 15 and 25 mm groups, respectively; see also Table 2). However, the slope of this correction did not differ significantly as a function of target size,  $F(1, 30) < 1$ .

## **Discussion**

The goal of the present experiment was to determine whether the processes responsible for the detection and correction of unintentional deviations of one's

movement aimed at a fixed target are solely based on the characteristics of the deviation or whether they are also adapted to the target's characteristics. We used a perturbation paradigm in which the cursor moved by the participants suddenly jumped between 5 mm and 25 mm to the right of a vector joining the starting base and the target, while the cursor was seen relatively far in the periphery of the retina ( $\sim 36^\circ$  of visual angle). Although participants were not aware of this cursor-jump, they soon (130-170 ms) corrected their movement in the direction opposite to the cursor-jump. Neither the size, the latency, nor the slope of the correction were modified by target-size.

Our observation that participants modified the trajectory of their movements to counteract the cursor-jump concurs with previous observations (Brenner and Smeets, 2003; Brière and Proteau, 2010; Franklin and Wolpert, 2008; Proteau et al., 2009; Sarlegna et al., 2003, 2004; Saunders and Knill, 2003, 2004, 2005). Our results also concurs with previous observations in that the corrections were initiated while the cursor was beyond  $10^\circ$  of visual angle (Brière and Proteau, 2010; Proteau et al., 2009); its latency was not related to the size of the cursor jump (Sarlegna et al., 2004); and the correction did not fully compensate for the size of the cursor-jump (Brière and Proteau, 2010; Proteau et al., 2009; Sarlegna et al., 2003, 2004; Saunders and Knill, 2003, 2004, 2005). An important new finding of the present experiment is that the slope of the correction was a function of the size of the cursor jump. This suggests that the error detection process put into play in the present study was sensitive enough not only to detect a deviation in the cursor trajectory but also to grade it.

Our results also concur in one important way with those reported by Brenner and Smeets (2003). These authors tested a condition in which both the cursor moved by the participants and the target jumped simultaneously and in the same direction. In this

condition, the cursor and target jumps did not modify the relative position of the cursor and of the target. Nonetheless, they noted that participants initiated a correction that apparently summed up the correction usually observed when only a target jump took place to that usually observed in reaction to a cursor jump. This suggests independent correction processes for the correction of the cursor jump and that of the target jump. In the present experiment, we observed the exact same correction for a cursor jump regardless of target size. Specifically, the amplitude of the correction did not differ for a 5 mm target-jump that would have resulted in participants missing a 5 mm target or was irrelevant for successfully reaching of a 30 mm target. This observation, that contradicts a minimal intervention principle (Todorov and Jordan 2002), strongly suggests that the correction for a cursor jump is solely related to the size of the induced error without consideration for target-size. In such, it suggests the existence of two error correction processes (or two independent stages of the same correction process), one acting early after movement initiation that ensures that the movement is initiated/progressed as planned and a second one acting later in the movement when the cursor and the target are seen relatively close to each other (Grierson and Elliott, 2007, 2008, 2009; Mackrout and Proteau, 2007; Tinjust and Proteau, 2009).

Before concluding that the early error detection and correction processes suggested above has as sole input the size of the detected error regardless of movement goal, we must consider that in the present experiment participants apparently always aimed at the center of the target (see Figure 3). Endpoint location and variability of no-jump trials did not significantly differ when aiming at the 5 mm or the 30 mm targets. Thus, it could be argued that the effective target size did not differ between these two experimental conditions, which would explain why participants behave similarly. We

performed a second experiment to determine whether a cursor-jump would still elicit a correction when participants are asked to plan and execute a movement that would end anywhere within the boundaries of a very large target.

## **Experiment 2**

### **Method**

#### *Participants*

Eleven new participants took part in this experiment. They were aged between 18 and 22 years old and were all naïve regarding the goal of the study. All participants were self-declared right-handed and reported normal or corrected-to-normal vision. They took part in a single 40-minute experimental session and were paid CAN 10\$ for their time. The Health Sciences Ethics Committee of the Université de Montréal approved this study.

#### *Task, apparatus, and procedures*

We used the same task and apparatus as in Experiment 1. Also, we used the same procedures as for Group 15 mm in Experiment 1 but with a few exceptions. Participants completed 10 familiarization trials followed by 160 experimental trials. There were 128 no-jump trials and 32 cursor-jump trials (20% perturbation as in Experiment 1). For all cursor-jump trials, the cursor jumped 100 ms after movement initiation. In all cases, the cursor jumped 15 mm to the right of its actual position. We used a single target. Its centre was located at 320 mm from the starting base. The target had an arc of 30°, starting at 7.5° and ending at 37.5° to the right of the participants' midline. The target was 30 mm deep. Participants were asked to "Aim in the general direction of the target and to stop the cursor within its boundaries in approximately 800 ms."

#### *Data reduction*

As expected and as illustrated in Figure 4 for a typical participant, the size of the

target and our instructions to aim in its general direction introduced large inter-trial variability. We used a bootstrapping technique to create representative estimates of control and perturbed trials (Efron and Tibshirani, 1993; Georgopoulos et al. 1999; Merchant et al. 2008). Briefly, for each participant and for both no-jump and cursor-jump trials, 32 trials were selected randomly with replacement, which gave us a sample of control and cursor-jump trials. The procedure was repeated 100 times, and the results obtained for the 100 samples of control and cursor-jump trials were averaged.

## **Results**

The results of the frontal coordinates of endpoint location relative to the starting position were submitted to t-tests (two-tailed) contrasting 2 Types of trials (no-jump vs. cursor-jump). This analysis revealed that cursor-jump trials ended significantly to the left of no-jump trials (95.7 mm vs. 102.2 mm, respectively),  $t(10) = 4.036$ ,  $p = .002$ , that is the direction opposite to that of the cursor-jump. Thus, participants corrected their movements for the cursor-jump. This correction did not result in a significant increase in movement time. On the contrary, cursor-jump trials had slightly shorter movement times than control trials (813 ms and 824 ms for cursor-jump and control trials, respectively),  $t(10) = -1.961$ ,  $p = .078$ .

To determine whether the characteristics of the correction for the cursor jump differed from those reported in Experiment 1, we contrasted the results of Group 15 mm when aiming at the 5 mm target in Experiment 1 (same cursor-jump size as in the present experiment) with those of the present experiment. The results revealed that the latency of the correction did not differ significantly across experiments (147 ms and 140 ms for Experiments 1 and 2, respectively),  $t(21) = .27$ ,  $p = .79$ . However, the slope (35.9 mm/s and 24.4 mm/s),  $t(21) = 2.58$ ,  $p = .017$  and ultimately the size (9.6 mm vs. 6.5 mm),  $t$



(21) = 2.07,  $p = .051$ , of this correction were significantly larger in Experiment 1 than in Experiment 2.

## **Discussion**

The results of this second experiment are straightforward. Participants corrected their movements for the cursor-jump even though this correction was not needed to perform the task successfully. The latency of this correction did not differ from those reported in Experiment 1. This suggests that error detection process engaged a corrective process, even if the correction was irrelevant considering the ultimate goal. However, the more gradual correction observed for the same cursor-jump size in the present experiment than in Experiment 1 suggests that the correction process takes into consideration the “urgency” of the correction. In Experiment 1, this urgency was reflected by steeper corrections for the larger cursor-jumps. In the present experiment, no correction was needed to reach the target; therefore, it was more gradual and not as large as in Experiment 1.

## **General discussion**

In the present study, we wanted to determine whether error detection and correction processes based on visual information and relative to the displacement of one’s hand toward a fixed target were solely driven by the stimulus that elicited them or also by the target’s characteristics. The results of the two experiments reported in the present paper revealed that the latency of the correction triggered by the cursor jump was not influenced in any way by the target’s characteristics. However, the execution of the correction was affected significantly by both the size of the cursor-jump and the target’s characteristics.

### *Correction latency*

Our observation that correction latency was not influenced by the size of the cursor-

jump concurs with results previously reported by Sarlegna et al. (2004). Also, as in Proteau et al. (2009), it indicates that even small deviations of the cursor from its intended path were detected by a very efficient error detection process that acts outside the central visual field ( $> 10^\circ$  of visual angle; see also Abahnini et al. 1997; Abahnini and Proteau 1999; Bard et al. 1985, 1990; Bédard and Proteau 2001, 2003; Blouin et al. 1993a, 1993b, 1996; Paillard, 1980; Paillard and Amblard, 1985; Proteau et al. 2000). The initiation of this correction does not appear to require attention from the participants because a correction was initiated while participants were not aware of the cursor-jump. The slope of the correction was a function of the size of the cursor jump (see also Sarlegna et al. 2004). This indicates that the error detection process put into play in the present study was sensitive enough not only to detect a deviation in the cursor trajectory but also to grade it. Recent evidence suggest that the correction is graded as a function of the position of the cursor rather than on its trajectory (Brenner and Smeets, 2003; Shabbott and Sainburg, 2009; but see also Saunders and Knill, 2004).

#### *Correction execution*

Although the correction that was initiated to counteract the cursor-jump was graded for its size, the results of Experiment 2 indicated that the slope of this correction was also influenced by target-size. Specifically, the slope of the correction for a 15 mm cursor-jump was significantly larger in Experiment 1 than in Experiment 2. It should be remembered that increasing the diameter of the target from 5 mm to 30 mm (Experiment 1) was not sufficient to observe this difference. This indicates that difference in target size that has been shown to influence correction processes likely based on a direct comparisons between the cursor and the target (Fitts, 1954; Crossman and Goodeve, 1983; Grierson and Elliott, 2008; Meyer et al. 1988; Tinjust and Proteau, 2009) were not

sufficient to influence the slope of the correction in Experiment 1. This suggests that the error correction process revealed in Experiment 2 has a different origin than those usually seen when the cursor and target are seen in central vision.

Because the latency of the correction was not influenced by target size, whereas target size modified the slope of the correction, it suggests that detection of an error and execution of a correction are based on distinct processes. This position concurs with recent observations reported by Glover et al. (2005). In that study, participants reached to grasp a small or large illuminated cylinder. During the reach, the cylinder could change from large to small or small to large. When repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) was applied over the left intraparietal sulcus of the parietal cortex, Glover et al. observed a disruption in the on-line correction for a change in target size but only when the rTMS was applied concurrent with the initiation of the adjustment, not when it was applied after the adjustment had already begun. This proposition reconciles our findings with the minimal intervention principle advocated by Todorov and Jordan (2002) and suggests that initiation of a correction is automatic but that its execution is functional.

An alternative interpretation of our finding could be that the gain of the error correction process triggered by the cursor-jump could be modulated as a function of the task's constraints. When these constraints are relatively loose like in Experiment 2, it could be that the gain of the error correction process is set relatively low. Again, this proposition reconciles our findings with the minimal intervention principle advocated by Todorov and Jordan (2002). Specifically, effective target size was relatively small in Experiment 1, whereas it was very large in Experiment 2, which explains why steeper corrections were observed in former than in the latter experiment. In turn, this suggests that one has some control on which component(s) of the movement to more loosely or

strictly control.

### *Partial corrections for cursor jumps*

The results of the present study concur with all previous research using a cursor-jump paradigm (Brière and Proteau, 2010; Proteau et al., 2009; Sarlegna et al., 2004; Saunders & Knill, 2003, 2004, 2005) to indicate that there is a limit to the size of the correction that can be performed by this apparently attention-free online corrective process. For instance, the correction for the cursor-jump compensated for only between 45% (Sarlegna et al., 2004) and 80% (Saunders and Knill, 2003) of the imposed bias. In the present study, this correction was of approximately 60-65%. Proteau et al. (2009) suggested that the limits of the correction process could be exceeded when the error falls outside the normal variability of one's movement. Although this could be the case with relatively large cursor-jumps, this explanation does not fit well with the partial correction observed in Experiment 1 for a 5 mm cursor-jump. Rather, it could be that asking participants to complete their movement in a single motion (present study; Brière and Proteau 2010; Proteau et al., 2009), considering it completed when their hand was still traveling at a relatively high velocity (100 mm/s; Saunders and Knill, 2003), or asking participants to produce very fast movements (Bédard and Proteau, 2003; Sarlegna et al., 2003, 2004), probably prevented them to complete their corrections. Conversely, as previously suggested by Sarlegna et al. (2004), a conflict between the seen position of the cursor and the felt position of the hand induced by the cursor-jump may have limited the participant's ability to produce a complete correction.

### *Conclusion*

When a reaching movement deviates from its intended path, quick and graded

corrections are initiated while one's hand (or a cursor) is seen in peripheral vision. This correction occurs even when it is not required to complete the task successfully. This suggests that the initiation of the correction is based on a comparison between the intended and actual movement trajectory without much consideration to the ultimate movement goal. On the contrary, the execution of the correction takes into consideration not only the size of the error that has been detected but also the task's constraints. These constraints likely influenced the gain of the correction processes put into play early after movement initiation when one's movement deviates from its intended trajectory.

## References

- Abahnini, K, Proteau L, Temprado, JJ (1997). Evidence supporting the importance of peripheral visual information for the directional control of aiming movement. *J Mot Behav* 29:230-242.
- Abhanini K, Proteau L (1999). The role of peripheral and central visual information for the directional control of manual aiming movements. *Can J Exp Psychol* 53:160-175.
- Bard C, Hay L, Fleury M (1985). Role of peripheral-vision in the directional control of rapid aiming movements. *Can J Psychol* 39:151-161.
- Bard C, Hay L, Fleury M (1990). Timing and accuracy of visually directed movements in children – control of direction and amplitude components. *J Exp Child Psychol* 50:102-118.
- Bédard P, Proteau L (2001). On the role of static and dynamic visual afferent information in goal-directed aiming movements. *Exp Brain Res* 138:419-431.
- Bédard P, Proteau L (2003). On the role of peripheral visual afferent information for the control of rapid video-aiming movements. *Acta Psychol* 113:99-117.
- Blouin J, Bard C, Teasdale N, Fleury M (1993a). Online versus off-line control of rapid aiming movements. *J Mot Behav* 25:275-279.
- Blouin J, Teasdale N, Bard C, Fleury M (1993b). Directional control of rapid arm movements: The role of the kinetic visual feedback system. *Can J Exp Psychol* 47:678-696.
- Blouin J, Gauthier GM, Vercher JL, Cole J (1996). The relative contribution of retinal and extraretinal signals in determining the accuracy of reaching movements in normal subjects and a deafferented patient. *Exp Brain Res* 109:148-153.

- Brenner E, Smeets JB (2003). Fast corrections of movements with a computer mouse. *Spat Vis* 16:365-76.
- Bridgeman B, Lewis S, Heit G, Martha N (1979). Relation between cognitive and motor-oriented systems of visual position perception. *J Exp Psychol: Hum Percept and Performance* 5:692-700.
- Brière J, Proteau L (2010). Movement error detection and correction based on automatic and attention-free processes. Submitted for publication.
- Cameron BD, Franks IM, Enns JT, Chua R (2007). Dual-target interference for the 'automatic pilot' in the dorsal stream. *Exp Brain Res* 182:297-305.
- Crossman ERFW, Goodeve PJ (1983). Feedback-control of hand-movement and Fitts law. *Q J Exp Psychol* 35:251-278.
- Desmurget M, Epstein CM, Turner RS, Prablanc C, Alexander GE, Grafton ST (1999). Role of the posterior parietal cortex in updating reaching movements to a visual target. *Nature Neurosci* 2 :563-567.
- Desmurget M, Pélisson D, Rossetti Y, Prablanc C (1998). From eye to hand: Planning goal-directed movements. *Neurosci Biobehav Rev* 22:761-788.
- Efron B, Tibshirani R (1993). *An Introduction to the bootstrap*. New York: Chapman & Hall/CRC, 1993.
- Fitts PM (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J Exp Psychol* 47:381-91.
- Franklin DW, Wolpert DM (2008). Specificity of reflex adaptation for task-relevant variability. *J Neurosci* 28:14165-14175.

- Georgopoulos AP, Pellizzer G, Poliakov AV, & Schieber, MH (1999). Neural coding of finger and wrist movements. *J Comput Neurosci* 6:279-288.
- Glover S, Miall RC, Rushworth MFS (2005). Parietal rTMS disrupts the initiation but not the execution of on-line adjustments to a perturbation of object size. *J Cogn Neurosci* 17 :124-136.
- Goodale MA, Pelisson D, Prablanc C (1986). Large adjustments in visually guided reaching do not depend on vision of the hand or perception of target displacement. *Nature* 320:748-750.
- Grierson LE, Elliott D (2007). Goal-directed aiming and the relative contribution of two online control processes. *J Sport & Exercise Psychol* 29:S79-S79.
- Grierson LEM, Elliott D (2008). Kinematic analysis of goal-directed aims made against early and late perturbations: An investigation of the relative influence of two online control processes. *Hum Mov Sci* 27:839-856.
- Grierson LEM, Elliott D (2009). Goal-directed aiming and the relative contribution of two online control processes. *A J Psychol* 122:309-324.
- Johnson SH, Rotte M, Grafton ST, Hinrichs H, Gazzaniga MS, Heinze HJ (2002). *Neuroimage* 17: 1693-1704.
- Mackrout I, Proteau L (2007). Specificity of practice results from differences in movement planning strategies. *Exp Brain Res* 183:181-193.
- Merchant H, Naselaris T, Georgopoulos AP (2008). Dynamic sculpting of directional tuning in the primate motor cortex during three-dimensional reaching. *J Neurosci* 28:9164-9172.



- Meyer DE, Abrams RA, Kornblum S, Wright CE, Smith JE (1988). Optimality in human motor performance: Ideal control of rapid aimed movements. *Psychol Rev* 95:340-370.
- Paillard, J. (1980). The multichanneling of visual cues and the organization of visually guided response. In G.E. Stelmach & J. Requin (Eds.), Tutorial in motor behavior (pp. 259-279). Amsterdam: North Holland.
- Paillard, J., & Amblard, B. (1985). Static versus kinetic visual cues for the processing of spatial relationships. In D.J. Ingle, M. Jeannerod, & D.N. Lee (Eds), NATO ASI Series: Brain mechanisms and spatial vision (pp. 299-330). La Haye: Martinus Nijhoff.
- Pisella L, Grea H, Tilikete C, Vighetto A, Desmurget M, Rode G, Boisson D, Rosetti Y (2000). An 'automatic pilot' for the hand in human posterior parietal cortex: toward reinterpreting optic ataxia. *Nature Neurosci* 3:729-736.
- Prablanc C, Martin O (1992). Automatic-control during hand reaching at undetected 2-dimensional target displacements. *J Neurophysiol* 67:455-469.
- Proteau L, Boivin K, Linossier S, Abahnini K (2000). Exploring the limits of peripheral vision for the control of movement. *J Mot Behav* 32:277-286.
- Proteau L, Roujoula A, Messier J (2009). Evidence for continuous processing of visual information in a manual video-aiming task. *J Mot Behav* 41:219-231.
- Sarlegna F, Blouin J, Bresciani JP, Bourdin C, Vercher JL, Gauthier GM (2003). Target and hand position information in the online control of goal-directed arm movements. *Exp Brain Res* 151:524-535.
- Sarlegna F, Blouin J, Vercher JL, Bresciani JP, Bourdin C, Gauthier GM (2004). Online control of the direction of rapid reaching movements. *Exp Brain Res* 157:468-471.

- Saunders JA, Knill DC (2003). Humans use continuous visual feedback from the hand to control fast reaching movements. *Exp Brain Res* 152:341-352.
- Saunders JA, Knill DC (2004). Visual feedback control of hand movements. *J Neurosci*, 24:3223-3234.
- Saunders JA, Knill DC (2005). Humans use continuous visual feedback from the hand to control both the direction and distance of pointing movements. *Exp Brain Res* 162:458-473.
- Shabbott BA, Sainburg RL (2009). On-line corrections for visuomotor errors. *Exp Brain Res* 195:59-72.
- Tinjust D, Proteau L (2009). Modulation of the primary impulse of spatially-constrained video-aiming movements. *Hum Mov Sci* 28:155-168.
- Todorov E, Jordan MI (2002). Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neurosci* 5:1226-1235.
- Woodworth RS (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychol Monographs* 3:1-114.

**Table 1.** Mean frontal and sagittal distance between the stylus and the center of the target at movement endpoint, and movement time as a function of the type of trials, target size, and cursor-jump amplitude. Frontal position: a negative value indicates that the stylus ended to the left of the target center. Sagittal position: a negative value indicates that the stylus ended short of the target center.

Type of trial	Target size	Cursor-jump amplitude		
		5 mm	15 mm	25 mm
<b>Frontal position (mm)</b>				
No-jump	5 mm	-1.0 (2.3)	-1.9 (2.1)	-3.8 (2.7)
	30 mm	-1.1 (2.7)	-2.0 (3.2)	-2.9 (2.2)
Cursor-jump	5 mm	-4.7 (2.5)	-11.5 (1.6)	-20.2 (2.2)
	30 mm	-4.0 (1.6)	-12.1 (1.6)	-18.4 (2.9)
<b>Sagittal position (mm)</b>				
No-jump	5 mm	0.8 (2.2)	0.9 (4.1)	2.2 (2.1)
	30 mm	-1.8 (2.2)	-0.2 (3.4)	3.0 (4.7)
Cursor-jump	5 mm	-0.1 (2.2)	-0.8 (6.6)	-1.2 (2.0)
	30 mm	-1.3 (1.9)	-2.1 (6.3)	0.8 (2.8)
<b>Movement time (ms)</b>				
No-jump	5 mm	674 (50)	698 (51)	670 (42)
	30 mm	686 (49)	686 (43)	669 (49)
Cursor-jump	5 mm	679 (44)	716 (52)	681 (52)
	30 mm	692 (50)	700 (49)	673 (42)

**Table 2.** Mean latency and slope of the correction (standard deviation) for a cursor-jump as a function of target size and cursor-jump amplitude.

Target size	Cursor-jump amplitude		
	5 mm	15 mm	25 mm
<b>Latency (ms)</b>			
5 mm	140 (94)	137 (47)	166 (29)
30 mm	172 (76)	145 (32)	144 (51)
<b>Slope (mm/s)</b>			
5 mm	15.7 (7.1)	35.9 (9.4)	65.3 (17.8)
30 mm	18.6 (10.7)	34.6 (8.7)	61.3 (21.1)

### Figure Captions

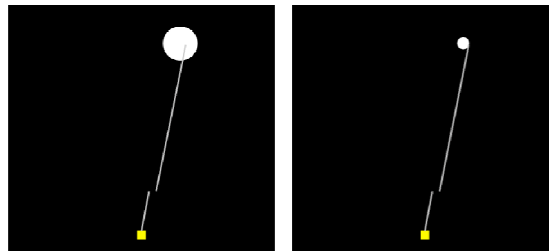
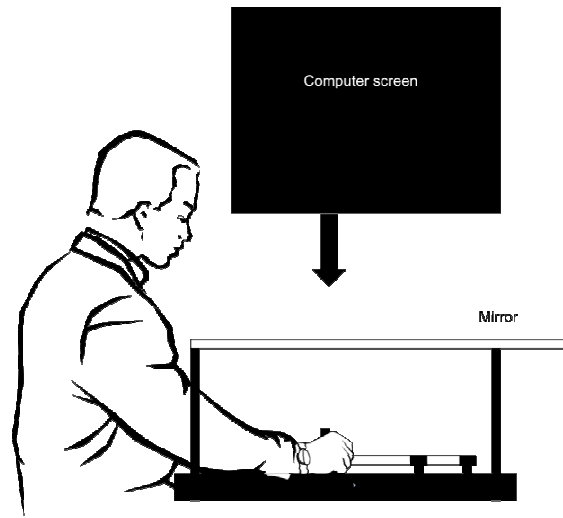
Figure 1. Top. View of the apparatus. Bottom. Illustration of 5 mm (top), 15 mm (middle) and 25 mm (bottom) cursor-jumps for movements aimed at 30 mm (left) and 5 mm (right) targets.

Figure 2. Stylus trajectories for no-jump (open markers) and cursor-jump (filled markers) trials aimed at 5 mm (grey markers) and 30 mm (black markers) targets located at 7.5° and 15° to the right of the starting base. The results are from one participant in each cursor-jump condition. The first marker indicates location of the cursor-jump. Subsequent markers occur at every 100 ms following the cursor-jump. The last marker illustrates movement endpoint. For the 15 mm and 25 mm cursor-jumps, a complete correction for the cursor-jump would have resulted in movement endpoint at the center of the filled targets.

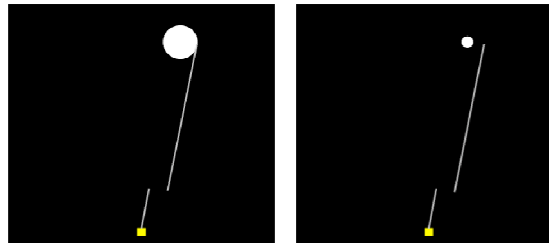
Figure 3. Mean movement endpoint and within-participant variability of the stylus location for cursor-jump trials aimed at the 5 mm (dark grey) and 30 mm (light gray) targets. Mean movement endpoint and within-participant variability of no-jump trials is illustrated by a single black dot. No-jump trials did not differ significantly regardless of target size or target location and therefore were collapsed together. A thin vertical line illustrates location of the stylus for a complete correction for the cursor-jump. Note the correction (although incomplete) for the cursor-jump for both the 5 mm, 15 mm and 25 mm groups. Note also that the size of the correction was not modified by target size.

Figure 4. Movement trajectories of no-jump (control) trials for one randomly selected participant in Experiment 2. Note the large variability in movement trajectories.

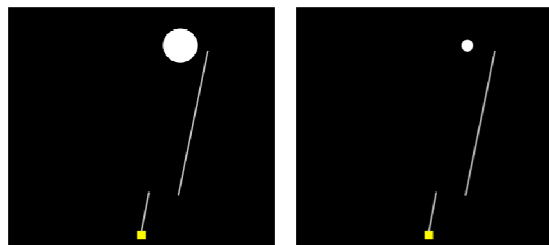
Figure 1.



5 mm cursor jump



15 mm cursor jump



25 mm cursor jump

Figure 2.

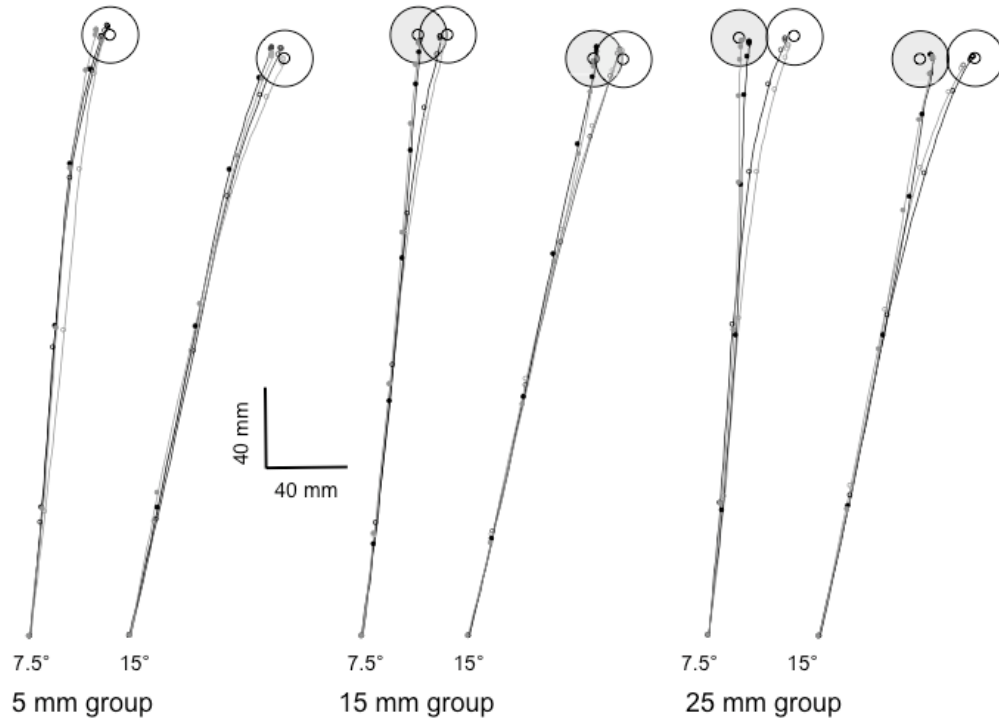


Figure 3.

### Movement Endpoint

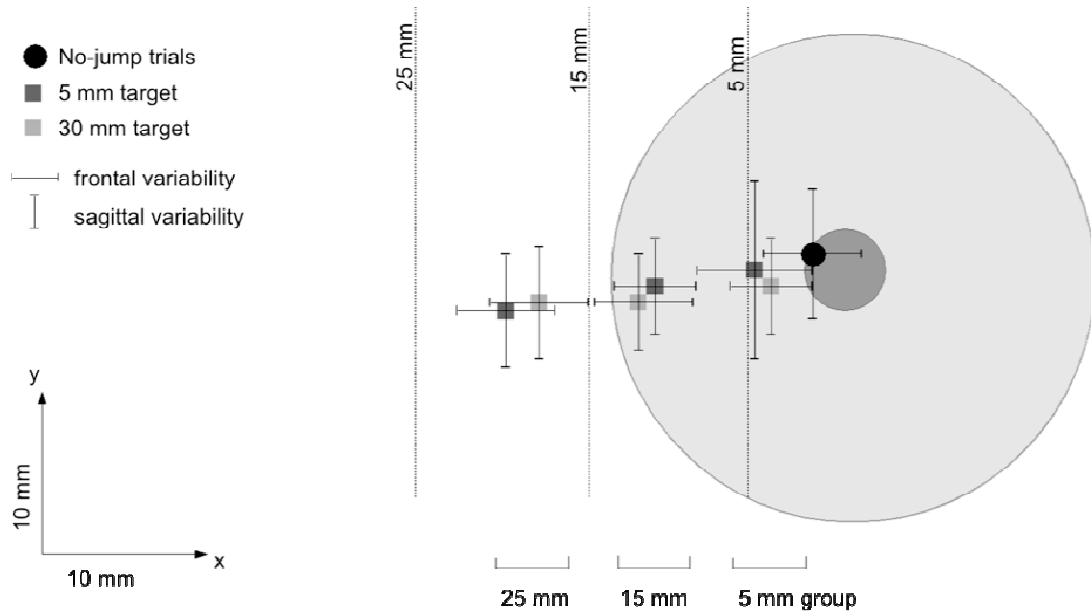
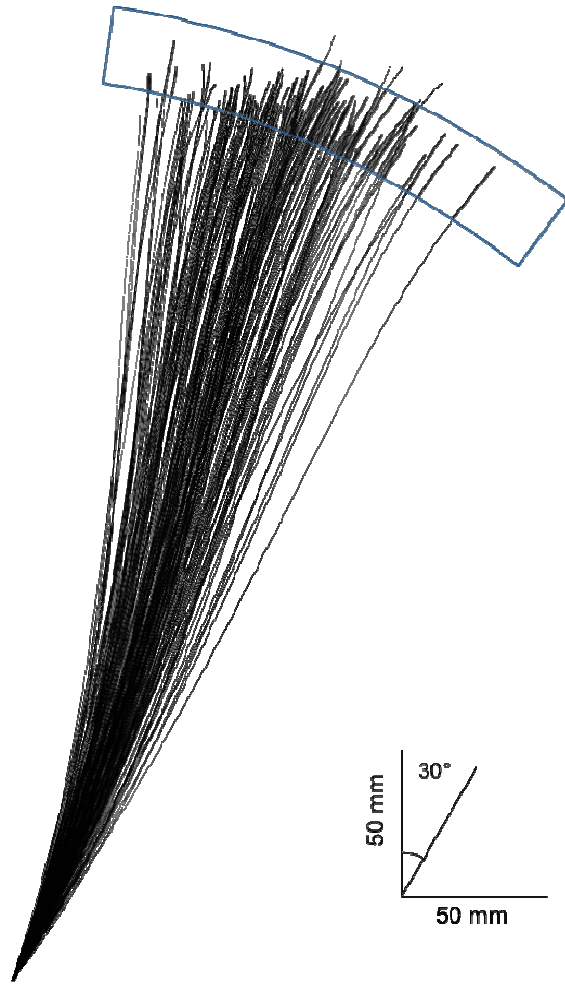




Figure 4.



## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Notre intérêt de recherche portait sur le niveau d'automatisme du processus de correction en temps réel d'un mouvement de pointage manuel. Nous nous sommes demandés quelle part de « réflexe » et quelle part de « fonctionnalité » composait ce processus. Deux hypothèses ont alors été proposées. Premièrement, les corrections en ligne seraient de nature réflexe (Franklin et Wolpert, 2008) et répondraient à l'écart créé par le saut de curseur entre la conséquence sensorielle attendue du mouvement planifié et celle actuelle du membre en déplacement. En effet, de cette manière, les corrections seraient amorcées sans tenir compte des informations relatives aux caractéristiques de la cible et donc sans tenir compte de la nécessité ou non de corriger le mouvement pour l'atteindre. La seconde proposition était que les corrections en temps réel étaient plus fonctionnelles et amorcées en regard d'une comparaison des positions relatives de la main et de la cible. Le saut de curseur éloignant la main (curseur) de la cible à atteindre, une correction du mouvement serait alors amorcée afin de ramener le curseur sur la cible. Ce procédé serait mis en place seulement lorsque la perturbation gêne l'atteinte de la cible visée. Nous avons donc utilisé le paradigme expérimental de saut de curseur dans nos expériences. Le saut de curseur était introduit aléatoirement et de manière à ce que les sujets ne puissent pas la repérer consciemment.

La première expérience nous a permis d'observer que l'amplitude de la correction était relative à l'amplitude du saut mais pas aux caractéristiques de la cible. La latence de correction était constante d'une condition expérimentale à l'autre. Ces résultats suggéraient que les corrections en temps réel pour le saut de curseur reflétaient

la mise en place tôt dans le mouvement d'un processus de correction basé sur les caractéristiques du mouvement planifié plutôt que sur celles de la cible, à l'inverse des corrections apportées pour un saut de cible qui seraient elles apportées tard dans le mouvement et basée sur les caractéristiques de la cible, ou du moins sur la position relative de la main par rapport à la cible. Cependant, il est apparu que les sujets visaient le centre de la cible à tous les essais, peu importe sa taille. Il était donc possible que les résultats obtenus reflètent une différence entre la taille objective de la cible (notre manipulation expérimentale) et la cible subjective (le centre de la cible, donc identique peu importe la taille objective de la cible) utilisée par les sujets.

La seconde expérience a alors été montée de manière à minimiser la précision requise du mouvement réalisé par les participants. Comme dans la première expérience, des corrections en temps réel étaient amorcées par les sujets, même si non nécessaires pour le bon déroulement de la tâche. De plus, la latence de ces corrections était comparable à celle observée dans la première expérience. Ces observations suggèrent que le déclenchement de telles corrections serait de nature automatique, voire réflexe (Franklin et Wolpert, 2008), et basé uniquement sur l'erreur induite. Cependant nous avons observé une vitesse et une amplitude de correction amoindries en comparaison à la première expérience. Nous en avons conclu que même si le processus de correction en temps réel était déclenché de manière automatique, son déroulement est influencé par les caractéristiques de la cible et le besoin fonctionnel de corriger ou pas. De là, nous proposons la présence de deux processus distincts pour (a) le déclenchement et (b) pour l'exécution des corrections en ligne suite à un saut de curseur. Le premier processus serait déclenché de manière très automatique comme proposé par Franklin et Wolpert (2008) et se baserait sur la comparaison de la conséquence sensorielle attendue

et de celle obtenue lors de l'exécution du mouvement ; il ne prendrait pas en compte les caractéristiques de l'objectif final. En revanche, le second processus gérant le déroulement des corrections tiendrait compte de ces informations et adapterait la vitesse et l'amplitude de la correction. Ainsi, des corrections plus rapides et plus amples sont apportées si la perturbation éloigne davantage l'effecteur de la cible à atteindre, en accord avec la théorie d'intervention minimale de Todorov et Jordan (2002).

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Abahnini, K, Proteau L, Temprado, JJ (1997). Evidence supporting the importance of peripheral visual information for the directional control of aiming movement. *J Mot Behav* 29:230-242.
- Abhanini K, Proteau L (1999). The role of peripheral and central visual information for the directional control of manual aiming movements. *Can J Exp Psychol* 53:160-175.
- Abbs JH, Gracco VL, Cole KJ (1984). Control of ultimovement coordination – sensorimotor mecanism in speech motot progrmming. *J Mot Behav* 16:195-231.
- Adams J (1971) A closed-loop theory of motor learning. *J Mot Behav* 3:111-149.
- Bard C, Hay L, Fleury M (1985). Role of peripheral-vision in the directional control of rapid aiming movements. *Can J Psychol* 39:151-161.
- Bard C, Hay L, Fleury M (1990). Timing and accuracy of visually directed movements in children – control of direction and amplitude components. *J Exp Child Psychol* 50:102-118.
- Bédard P, Proteau L (2001). On the role of static and dynamic visual afferent information in goal-directed aiming movements. *Exp Brain Res* 138:419-431.
- Bédard P, Proteau L (2003). On the role of peripheral visual afferent information for the control of rapid video-aiming movements. *Acta Psychol* 113:99-117.
- Bédard P, Proteau L (2004). On-line vs. off-line utilization of peripheral visual afferent information to ensure spatial accuracy of goal-directed movements. *Exp Brain Res* 158:75-85.

- Bédard P, Proteau L (2005). Movement planning of video and of manual aiming movements. *Spat Vis* 18:275-296.
- Blangero A, Gaveau V, Luaute J, Rode G, Salemme R, Guinard M (2008). A hand and a field effect in on-line motor control in unilateral optic ataxia. *Cortex* 44:560-568.
- Blouin J, Bard C, Teasdale N, Fleury M (1993a). Online versus off-line control of rapid aiming movements. *J Mot Behav* 25:275-279.
- Blouin J, Teasdale N, Bard C, Fleury M (1993b). Directional control of rapid arm movements: The role of the kinetic visual feedback system. *Can J Exp Psychol* 47:678-696.
- Blouin J, Gauthier GM, Vercher JL, Cole J (1996). The relative contribution of retinal and extraretinal signals in determining the accuracy of reaching movements in normal subjects and a deafferented patient. *Exp Brain Res* 109:148-153.
- Bourdin C, Bringoux L, Gauthier GM, Vercher JL (2006). Vision of the hand prior to movement onset allows full motor adaptation to a multi-force environment. *Brain Res Bull* 71:101-110.
- Brenner E, Smeets JB (2003). Fast corrections of movements with a computer mouse. *Spat Vis* 16:365-76.
- Bridgeman B, Lewis S, Heit G, Martha N (1979). Relation between cognitive and motor-oriented systems of visual position perception. *J Exp Psychol: Hum Percept and Performance* 5:692-700.
- Brière J, Proteau L (2010). Movement error detection and correction based on automatic and attention-free processes. Soumis pour publication.

- Cameron BD, Franks IM, Enns JT, Chua R (2007). Dual-target interference for the 'automatic pilot' in the dorsal stream. *Exp Brain Res* 182:297-305.
- Carlton LG (1981). Processing visual feedback information for movement control. *J Exp Psychol: Human Percept and Perform*, 7:1019-1030.
- Cheng DT, Luis M, Tremblay L (2008). Randomizing visual feedback in manual aiming: reminiscence of the previous trial condition and prior knowledge of feedback availability. *Exp Brain Res* 189:403-410.
- Cheng S, Sabes PN (2007). Calibration of visually guided reaching is driven by error-corrective learning and internal dynamics. *J Neurophysiol* 97:3057-3069.
- Crossman ERFW, Goodeve PJ (1983). Feedback-control of hand-movement and Fitts law. *Q J Exp Psychol* 35:251-278.
- Desmurget M, Epstein CM, Turner RS, Prablanc C, Alexander GE, Grafton ST (1999). Role of the posterior parietal cortex in updating reaching movements to a visual target. *Nature Neurosci* 2 :563-567.
- Desmurget M, Grafton S (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends Cogn Sci* 4:423-431.
- Desmurget M, Pélisson D, Rossetti Y, Prablanc C (1998). From eye to hand: Planning goal-directed movements. *Neurosci Biobehav Rev* 22:761-788.
- Desmurget M, Rossetti Y, Prablanc C, Stelmach GE, Jeannerod M (1995). Representation of hand position prior to movement and motor variability. *Can J Physiol Pharmacol*, 73:262-272.
- Efron B, Tibshirani R (1993). *An Introduction to the bootstrap*. New York: Chapman & Hall/CRC, 1993.

- Elliott D, Carson RG, Goodman D, Chua R (1991). Discrete vs. continuous visual control of manual aiming. *Hum Mov Sci* 10:393-418.
- Fitts PM (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J Exp Psychol* 47:381-91.
- Franklin DW, Wolpert DM (2008). Specificity of reflex adaptation for task-relevant variability. *J Neurosci* 28:14165-14175.
- Georgopoulos AP, Pellizzer G, Poliakov AV, & Schieber, MH (1999). Neural coding of finger and wrist movements. *J Comput Neurosci* 6:279-288.
- Glover S, Miall RC, Rushworth MFS (2005). Parietal rTMS disrupts the initiation but not the execution of on-line adjustments to a perturbation of object size. *J Cogn Neurosci* 17 :124-136.
- Goodale MA, Milner AD (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends Neurosci* 15:20-25.
- Goodale MA, Milner AD, Jakobson LS, Carey DP (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature* 349: 154-156.
- Goodale MA, Pélisson D, Prablanc C (1986). Large adjustments in visually guided reaching do not depend on vision of the hand or perception of target displacement. *Nature* 320:748-750.
- Grierson LE, Elliott D (2007). Goal-directed aiming and the relative contribution of two online control processes. *J Sport & Exercise Psychol* 29:S79-S79.
- Grierson LEM, Elliott D (2008). Kinematic analysis of goal-directed aims made against early and late perturbations: An investigation of the relative influence of two online control processes. *Hum Mov Sci* 27: 839-856.



- Grierson LEM, Elliott D (2009). Goal-directed aiming and the relative contribution of two online control processes. *A J Psychol* 122: 309-324.
- Heath M (2005). Role of limb and target vision in the online control of memory-guided reaches. *Mot Control* 9:281-311.
- Jackson SR, Newport R, Mort D, Husain M (2005). Where the eye looks, the hand follows: Limb-dependent magnetic misreaching in optic ataxia. *Current Biol* 15:42-46.
- Johnson SH, Rotte M, Grafton ST, Hinrichs H, Gazzaniga MS, Heinze HJ (2002). *Neuroimage* 17: 1693-1704.
- Keele SW (1968) Movement control in skilled motor performance. *Psychol Bull* 70:387-403
- Keele SW, Posner MI (1968) Processing of visual feedback in rapid movements. *J Exp Psychol* 77:155-158
- Khan MA, Franks IM (2003). Online versus offline processing of visual feedback in the production of component submovements. *J Mot Behav* 35:285-295.
- Liu G, Chua R, Enns JT (2008). Attention for perception and action: task interference for action planning, but not for online control. *Exp Brain Res* 185:709-717.
- Mackrout I, Proteau L (2007). Specificity of practice results from differences in movement planning strategies. *Exp Brain Res* 183:181-193.
- Merchant H, Naselaris T, Georgopoulos AP (2008). Dynamic sculpting of directional tuning in the primate motor cortex during three-dimensional reaching. *J Neurosci* 28:9164-9172.

- Meyer DE, Abrams RA, Kornblum S, Wright CE, Smith JE (1988). Optimality in human motor performance: Ideal control of rapid aimed movements. *Psychol Rev* 95:340-370.
- Paillard, J. (1980). The multichanneling of visual cues and the organization of visually guided response. In G.E. Stelmach & J. Requin (Eds.), Tutorial in motor behavior (pp. 259-279). Amsterdam: North Holland.
- Paillard, J., & Amblard, B. (1985). Static versus kinetic visual cues for the processing of spatial relationships. In D.J. Ingle, M. Jeannerod, & D.N. Lee (Eds), NATO ASI Series: Brain mechanisms and spatial vision (pp. 299-330). La Haye: Martinus Nijhoff.
- Pisella L, Grea H, Tilikete C, Vighetto A, Desmurget M, Rode G, Boisson D, Rosetti Y (2000). An 'automatic pilot' for the hand in human posterior parietal cortex: toward reinterpreting optic ataxia. *Nature Neurosci* 3:729-736.
- Prablanc C, Echallier JE, Komilis E, Jeannerod, M. (1979a). Optimal response of eye and hand motor systems in pointing to a visual target. *Biol Cyber* 35 : 113-124.
- Prablanc C, Echallier J., Jeannerod M, Komilis E. (1979b). Optimal responses of eye and hand motor systems in pointing at a visual target: II. Static and dynamic visual cues in the control of hand movement. *Biol Cyber*, 35:183-187.
- Prablanc C, Martin O (1992). Automatic-control during hand reaching at undetected 2-dimensional target displacements. *J Neurophysiol* 67:455-469.
- Prablanc C, Pélisson D, Goodale MA (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb .1. Role of retinal feedback of target position in guiding the hand. *Exp Brain Res* 62:293-302.

- Proteau L (2005). Visual afferent information dominates other sources of afferent information during mixed practice of a video-aiming task. *Exp Brain Res* 161:441-456.
- Proteau L, Boivin K, Linossier S, Abahnini K (2000). Exploring the limits of peripheral vision for the control of movement. *J Mot Behav* 32:277-286.
- Proteau L, Isabelle G (2002). On the role of visual afferent information for the control of aiming movements toward targets of different sizes. *J Mot Behav* 34:367-384.
- Proteau L, Marteniuk RG, Girouard Y, Dugas C (1987). On the type of information used to control and learn an aiming movement after moderate and extensive training. *Hum Mov Sci* 6:181-199.
- Proteau L, Masson G (1997). Visual perception modifies goal-directed movement control: Supporting evidence from a visual perception paradigm. *Q J Exp Psychol* 50A:726-741.
- Proteau L, Roujoula A, Messier J (2009). Evidence for continuous processing of visual information in a manual video-aiming task. *J Mot Behav* 41:219-231.
- Rossetti Y, Stelmach G, Desmurget M, Prablanc C, Jeannerod M (1994). The effect of viewing the static hand prior to movement onset on pointing kinematics and variability. *Exp Brain Res* 101:323-330.
- Sarlegna F, Blouin J, Bresciani JP, Bourdin C, Vercher JL, Gauthier GM (2003). Target and hand position information in the online control of goal-directed arm movements. *Exp Brain Res* 151:524-535.
- Sarlegna F, Blouin J, Vercher JL, Bresciani JP, Bourdin C, Gauthier GM (2004). Online control of the direction of rapid reaching movements. *Exp Brain Res* 157:468-471.

- Sarlegna FR (2006). Impairment of online control of reaching movements with aging :  
A double step study. *Neurosci Lett* 403:15.
- Sarlegna FR, Sainburg RL (2007). The effect of target modality on visual and proprioceptive contributions to the control of movement distance. *Exp Brain Res* 176:267-280.
- Saunders JA, Knill DC (2003). Humans use continuous visual feedback from the hand to control fast reaching movements. *Exp Brain Res* 152:341-352.
- Saunders JA, Knill DC (2004). Visual feedback control of hand movements. *J Neurosci* 24:3223-3234.
- Saunders JA, Knill DC (2005). Humans use continuous visual feedback from the hand to control both the direction and distance of pointing movements. *Exp Brain Res* 162:458-473.
- Schmidt RA (1975) A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychol Rev* 82:225-260
- Shabbott BA, Sainburg RL (2009). On-line corrections for visuomotor errors. *Exp Brain Res* 195:59-72.
- Soechting JF, Lacquaniti F (1983). Modification of trajectory of pointing movement in response to a change in target location. *J Neurophysiol* 49: 548-564.
- Tinjust D, Proteau L (2009). Modulation of the primary impulse of spatially-constrained video-aiming movements. *Hum Mov Sci* 28:155-168.
- Todorov E (2004). Optimality principles in sensorimotor control. *Nature Neurosci* 7:907-915.
- Todorov E, Jordan MI (2002). Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neurosci* 5:1226-1235.

Veerman MM, Brenner E, Smeets JBJ (2008). The latency for correcting a movement depends on the visual attribute that defines the target. *Exp Brain Res* 187:219-228.

Vercher JL, Magenes G, Prablanc C, Gauthier GM (1994). Eye-head-hand coordination in pointing at visual targets – spatial and temporal analysis. *Exp Brain Res* 99:507-523.

Woodworth RS (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychol Monographs* 3:1-114.